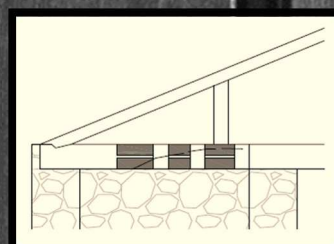
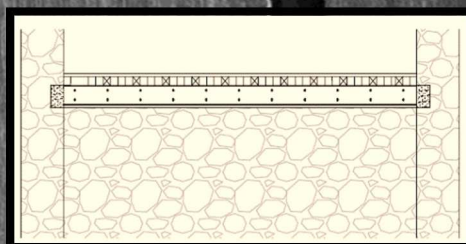
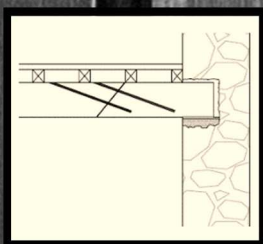




Estudio comparativo de sistemas de rehabilitación en forjados de madera



Universidad da Coruña

Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Departamento de Tecnología de la Construcción

Autor: Laura Gayo Calo

Directora: M. Dolores Otero Chans

Julio 2015

Estudio comparativo de sistemas de rehabilitación en forjados de madera

Universidad da Coruña

Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Departamento de Tecnología de la Construcción

Autor: Laura Gayo Calo

Directora: M. Dolores Otero Chans

Julio 2015

Agradecimientos

Este trabajo es el punto final de una etapa. En ella, he conseguido llenarme de nuevas experiencias, que he compartido con personas maravillosas y todas merecen mi más sincero agradecimiento:

A mi familia, que es mi fuente de energía, agradecerles todo el apoyo constante e incondicional que siempre me han proporcionado. Gracias por ayudarme a quitar las zarzas, que muchas veces crecen por el camino y me impiden avanzar.

A mis amigos, que son mi segunda familia, agradecerlos vuestras horas de paciencia, vuestros minutos de atención, y sobre todo, aquellos segundos que transformáis en infinitas horas de diversión.

A mi tutora, por su esfuerzo y dedicación para llevar a cabo este trabajo. Sus conocimientos y sus buenas orientaciones han sido de gran ayuda y necesarias a la hora de elaborar este estudio.

También, me gustaría agradecer a todas aquellas personas, que sin conocerme de nada, se han prestado a ayudar, dedicando unos minutos de su valioso tiempo para colaborar en la realización del presente trabajo.

“Uno mira hacia atrás con agradecimiento a los maestros brillantes, pero con gratitud a aquellos que tocaron nuestros sentimientos humanos” (Carl Jung).

Resumen

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es el estudio de diferentes tipos de sistemas de reparación y/o refuerzos en forjados de madera, para la consolidación y conservación de las estructuras realizadas con dicho material.

El trabajo consta de dos líneas de estudio fundamentales, una primera de ámbito teórico y la segunda más enfocada a una aplicación práctica.

La primera ha consistido en la descripción previa de lo que es un forjado, incluyendo el estudio de sus funciones y tipologías. Se ha narrado la evolución sufrida en los forjados, partiendo desde las maneras antiguas de elaborarlos hasta los sistemas más actuales, los cuales gracias a las nuevas tecnologías, han revolucionado su construcción al introducir nuevos materiales compuestos de madera, nuevos elementos y nuevos modos de fabricación.

Se ha presentado una breve descripción de la madera como material junto con sus propiedades. Aspecto importantísimo a tener en cuenta, ya que serán sus propiedades las que influyan de manera determinante en su comportamiento como elemento estructural.

Se han estudiado las causas de patologías que afectan a la madera, las cuales son responsables de la necesidad de realizar intervenciones de sustitución o reparación, para asegurar la integridad y estabilidad de las estructuras afectadas. Con ello, se han presentado a su vez, las técnicas de inspección para poder establecer una buena evaluación de daños, utilizando los métodos más apropiados en cada caso, evitando así, una mala gestión en las reparaciones.

La segunda parte del trabajo se orienta hacia un ámbito práctico, donde se analizan los posibles sistemas de reparación en forjados existentes en la actualidad. Describiendo su proceso de ejecución junto con las posibles ventajas e inconvenientes que resultan de su aplicación.

Finalmente se ha procedido a realizar una materialización de los conceptos estudiados, por medio de un ejemplo práctico, donde se han analizado una serie de métodos de intervención, para la reconstrucción de un forjado en un pazo.

Palabras clave: forjado, madera, sistemas de consolidación/refuerzo, patologías, daños.

Abstract

The main goal of this final project is the study of different kinds of repair systems and/or reinforcements wooden floor for the consolidation and conservation of the structures made with this material.

I have focused in two main study points for this project; one with a theoretical base and one focused in a more practical way.

The first one is the previous description of what a floor is along with the study of its functions and typologies. Subsequently, the project offers an explanation of the evolution of the floor, since the ancient systems for its elaboration to the newest ones, which due to the new technologies has revolutionized its construction bringing on new materials made of wood, new elements and new modes of manufacturing.

A brief description of the wood as a material along with its features is also included. Actually, this is an important aspect to bear in mind because it is its features the ones which make a great impact on its behavior as an structural element.

The pathologies affecting the wood, which are responsible of the need to make replacement interventions or repair interventions to ensure the integrity and the stability of the affected structures are also included in the study. Along with this, we have also the inspection techniques to make possible a great damage assessment by using the most appropriate methods in each case avoiding a bad reparation management.

As I have mentioned above, the other main subject is focused in a more practical point of view. As for this, I have analyzed the potential wrought reparation systems that exist nowadays; depicting its implementation process along with the potential advantages and potential disadvantages of its application.

Lastly, an embodiment of the concepts exposed throughout the project has been made with a practical example where a number of intervention methods have been applied for a wrought reconstruction on a manor.

Key Words: floor, wood, systems consolidation/reinforcement, diseases, damage.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	16
1. Forjados	18
1.1 Definición de forjado.....	18
1.2 Funciones del forjado	18
1.2.1 Función resistente.....	18
1.2.2 Función separadora	19
1.3 Tipologías de forjados.	19
1.3.1 Según el sistema de transmisión de cargas	19
1.3.2 Según el sistema de ejecución.....	20
1.3.3 Según el grado de hiperestatismo.....	21
1.4 Evolución de los forjados de madera.	21
1.4.1 Sistemas históricos.	23
1.4.1.1 Revoltones	24
1.4.1.2 Los casetonados	25
1.4.1.3 Entablados	25
1.4.1.4 Forjados de rasillas	26
1.4.2 Sistemas actuales.	26
1.4.2.1 Sistemas en cajón.	27
1.4.2.2 Tableros contralaminados.....	28
1.4.2.3 Otras soluciones.....	29
2. Patologías en estructuras de madera.	30
2.1 El material	30
2.1.1. Propiedades básicas.....	31
2.1.2. Propiedades físicas.....	31
2.1.3. Propiedades mecánicas.....	32
2.2 Causas de patologías.	34
2.2.1 Patologías de origen biótico.....	35
2.2.2. Patologías de origen abiótico	39
2.2.3. Patologías de origen estructural.....	42
3. Evaluación de daños	44
3.1. Técnicas de inspección	44
3.1.1 Técnicas visuales.....	44
3.1.2 Técnicas instrumentales	45
4. Tratamientos curativos.....	47

5.	Sistemas de consolidación y/o refuerzo de forjados de madera.....	51
5.1	Adición de elementos estructurales	52
5.2.1	Refuerzo mediante colocación de apeo.	52
5.2.2	Parteluces	54
5.2	Refuerzo y/o prótesis.....	55
5.2.3	Soluciones mediante aporte de madera.....	55
5.2.4	Soluciones mediante utilización de acero	58
5.2.5	Soluciones mediante sistemas FRP	65
5.2.6	Soluciones mediante formulaciones epoxi.	67
5.2.7	Soluciones con sistema mixto madera-hormigón.....	70
6.	Conclusión: Comparativa entre los diferentes métodos.	81
	CASO PRÁCTICO.....	89
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
	CONTENIDO DEL CD.....	139

Índice de ilustraciones.

Ilustración 1. Representación de transmisión de cargas forjado unidireccional.	19
Ilustración 2. Forjado unidireccional madera.	19
Ilustración 3. Representación de transmisión de cargas forjado bidireccional.	20
Ilustración 4. Forjado bidireccional madera.	20
Ilustración 5. Forjado de madera "in situ".	20
Ilustración 6. Forjados de madera prefabricados.	20
Ilustración 7. Forjado de piso de un orden de vigas	23
Ilustración 8. Forjado de piso de dos órdenes de vigas	23
Ilustración 9. Axonometría forjado de revoltones.	24
Ilustración 10. Secciones forjados con técnica de revoltones.	24
Ilustración 11. Axonometría y sección de un forjado a casetones.	25
Ilustración 12. Axonometría y sección de forjado entablado	25
Ilustración 13. Axonometría y sección de forjado de rasilla.	26
Ilustración 14. Módulo sistema en cajón	27
Ilustración 15. Modelo estándar sistema LIGNATUR.	27
Ilustración 16. Modelo que presenta mayor resistencia al fuego hasta REI 90.	27
Ilustración 17. Modelo que permite la combinación de todas las funciones necesarias: estructural, resistencia al fuego, aislamiento...	27
Ilustración 18. Montaje forjado con paneles LIGNATUR.	28
Ilustración 19. Paneles KLH.	28
Ilustración 20. Montaje del forjado mediante paneles de madera contralaminada.	29
Ilustración 21. Edificación con forjado de paneles KLH.	29
Ilustración 22. Paneles prefabricados KIELSTEG.	29
Ilustración 23. Colocación de los módulos KIELSTEG.	29
Ilustración 24. Partes de la madera.	30
Ilustración 25. Eje tangencial.	31
Ilustración 26. Eje radial.	31
Ilustración 27. Eje longitudinal.	31
Ilustración 28. Flexión.	33
Ilustración 29. Compresión paralela a la fibra.	33
Ilustración 30. Compresión perpendicular a la fibra.	33
Ilustración 31. Tracción perpendicular a la fibra.	34
Ilustración 32. Tracción paralela a la fibra.	34
Ilustración 33. Tensiones tangenciales de cortadura.	34
Ilustración 34. Tensiones tangenciales de deslizamiento.	34
Ilustración 35. Tensiones tangenciales de rodadura.	34
Ilustración 36. Madera afectada por hongos	35
Ilustración 37. Forjado de madera con pudrición parda.	36
Ilustración 38. Daños producidos por hongos de pudrición blanca.	36
Ilustración 39. Daños por pudrición blanda.	36
Ilustración 40. Daños producidos por insectos de ciclo larvario.	36
Ilustración 41. Apeo cabeza de viga con viga carrera apoyada sobre ménsulas de piedra.	52
Ilustración 42. Apeo cabeza de viga con viga carrera apoyada sobre elementos metálicos.	52
Ilustración 43. Apeo sobre viga carrera realizada con perfil metálico.	53
Ilustración 44. Vigas metálicas para soporte del forjado de madera en un tramo.	53
Ilustración 45. Viga carrera de hormigón para soporte de cabezas de viga del forjado de madera.	53

Ilustración 46. Reparación forjado mediante viga de borde empotrada en el muro.	54
Ilustración 47. Forjado con viga de borde de acero.	54
Ilustración 48. Solución mediante parte luces.	55
Ilustración 49. Disposición de jabalcones mediante ensamble en viga.	55
Ilustración 50. Disposición de jabalcones mediante pieza equilibrante de empujes.	55
Ilustración 51. Refuerzo de viguetas en un forjado.	56
Ilustración 52. Diagrama de momentos de viga.	56
Ilustración 53. Solución con aporte de madera.	56
Ilustración 54. Sección forjado madera reforzado con duplicación de viguetas.	57
Ilustración 55. Refuerzo de viga en apoyo con piezas de madera.	57
Ilustración 56. Consolidación de viga mediante madera encolada.	58
Ilustración 57. Prótesis de madera con unión reforzada con elementos metálicos.	58
Ilustración 58. Solución con prótesis en cabezal y vano.	58
Ilustración 59. Apeo y apertura de huecos.	59
Ilustración 60. Colocación de perfiles.	59
Ilustración 61. Fijación de perfiles.	59
Ilustración 62. Viga reforzada con perfiles metálicos.	59
Ilustración 63. Refuerzo en apoyo de viga de madera.	60
Ilustración 64. Reparación de una rotura con pletinas metálicas.	60
Ilustración 65. Apeo y apertura de hueco.	60
Ilustración 66. Elaboración de dado de hormigón y colocación de perfil.	60
Ilustración 67. Viga reforzada.	60
Ilustración 68. Sección viga reforzada con sistema estandarizado.	61
Ilustración 69. Colocación de los perfiles en los extremos.	61
Ilustración 70. Ubicación del perfil central.	62
Ilustración 71. Soldadura del elemento lineal.	62
Ilustración 72. Colocación de gatos hidráulicos para aplicación de preflechado.	62
Ilustración 73. Fijación de los soportes.	63
Ilustración 74. Proceso de macizado.	63
Ilustración 75. Refuerzo con pletina de acero.	64
Ilustración 76. Corte de la madera para introducir pieza.	64
Ilustración 77. Atornillado, unión madera-metal.	64
Ilustración 78. Refuerzo ensamblado en la viga.	65
Ilustración 79. Relleno de la zona de entrevigado con mortero aligerado.	65
Ilustración 80. Refuerzo de viga mediante un tirante inferior.	65
Ilustración 81. Refuerzo de viga con sistema FRP.	66
Ilustración 82. Refuerzo con FRP en distintas posiciones.	66
Ilustración 83. Colocación de perfil FRP.	67
Ilustración 84. Sistema mixto perfil FRP-madera.	67
Ilustración 85. Sistema Beta.	67
Ilustración 86. Corte transversal.	68
Ilustración 87. Corte dentado.	68
Ilustración 88. Proceso sistema Beta en encuentro viga-muro.	68
Ilustración 89. Esquemas de cosido.	69
Ilustración 90. Proceso del cosido con varilla de fibra en una viga.	69
Ilustración 91. Viga con placas de refuerzo.	70
Ilustración 92. Conector BASE.	72
Ilustración 93. Conector MAXI.	72
Ilustración 94. Sistema con barras de acero corrugadas.	72
Ilustración 95. Forjado mixto con vinculación mediante uso de barras de acero corrugado.	72
Ilustración 96. Sistema con conectores de chapa metálica doblada.	73

Ilustración 97. Sistema Godycki, Pawlica, Kleszczewski, Romanowska.	73
Ilustración 98. Vinculación mediante conector AL-FER.	74
Ilustración 99. Chapa metálica sin más elementos.	74
Ilustración 100. Chapa metálica adherida a la madera con bulones y al hormigón mediante conectadores tipo barra.	74
Ilustración 101. La chapa es un perfil en T, pegado a la madera con resinas epoxi y anclado al hormigón por una barra en zig-zag.	75
Ilustración 102. Sistema Alessi, Raffagli, Lamborghini	75
Ilustración 103. Sistema de resaltos con fijaciones metálicas.	76
Ilustración 104. Sistema con acanaladura en vigueta.	76
Ilustración 105. Sistema Cecchi.	77
Ilustración 106. Sistema con conectores tubulares.	77
Ilustración 107. Sistema Wood Beton.	78
Ilustración 108. Sistema Llear, primera generación.	79
Ilustración 109. Sistema Llear, segunda generación	79
Ilustración 110. Sistema con unión VB.	79
Ilustración 111. Conector VB.	79
Ilustración 112. Sistema L.P.R., Peter Cox.	80
Ilustración 113. Conector tipo Flap, Peter Cox.	80

Índice de figuras

Figura 1. Empleo de materiales en los forjados a lo largo de la historia.	21
Figura 2. Resumen de agentes bióticos.	39
Figura 3. Agentes de alteración de la madera.	43
Figura 4. Resumen de los posibles tratamientos curativos dependiendo del agente destructor.	50
Figura 5. Clasificación de refuerzos globales vs puntuales.	82
Figura 6. Comparativa según situación del refuerzo sobre elemento a reforzar.	83
Figura 7. Clasificación de los refuerzos según ubicación.	84
Figura 8. Relación entre el daño producido y el tipo de sistema a ejecutar.	86

INTRODUCCIÓN

La madera es el material de construcción más antiguo utilizado por el hombre y es un material natural y renovable que requiere bajo consumo de energía durante la fase de producción. También es completamente biodegradable y de fácil limpieza, es ligero pero muy fuerte, tiene buena elasticidad, es un excelente aislante térmico, eléctrico y acústico. (EdificaeVilssa, 2015). Gracias a estas propiedades, y por ser un material de fácil obtención en casi todas las geografías, prácticamente todas las culturas han utilizado la madera para la construcción de sus viviendas.

El uso de la madera en el sector de la construcción abarca infinidad de elementos. Pasa por constituir elementos estructurales como muros, soportes y forjados, hasta la elaboración de simples piezas decorativas, mobiliario, etc. En los sucesivos apartados hablaremos de la madera, desde un punto de vista enfocado a su uso como elemento estructural en forjados.

A pesar de las múltiples ventajas que proporciona la madera en la edificación, resulta ser un material bastante sensible a las agresiones y fácilmente destructible. Por causa de las degradaciones, es necesario realizar operaciones que aseguren la estabilidad y la conservación de las piezas. Por ende, según el estado que pueda presentar la madera en el momento de la intervención, se plantean dos tipos de reparación: la sustitución y el refuerzo.

Haciendo énfasis en la gran relevancia que tuvo y tiene la madera en la construcción, y apostando por su conservación en las viviendas, en este trabajo se pretende estudiar los diferentes tipos de sistemas de reparación y/o refuerzos en forjados de madera, analizando su proceso constructivo, así como las ventajas e inconvenientes que presentan y elaborando una visión comparativa conjunta de todos ellos.

1. Forjados

Con el paso del tiempo las viviendas han ido evolucionando, se ha pasado de construir simples casas de planta baja con una cubierta a construir viviendas tan complejas como son los rascacielos. La evolución de las viviendas ha sido muy grande, al igual que los forjados que se han realizado en ellas, partiendo de la utilización de troncos simplemente apoyados a lograr generar estructuras más complejas utilizando otros materiales.

La madera, como material, fue muy utilizada durante gran parte de la historia de la construcción, así nacerían los primeros forjados elaborados con este material. Pero el incesante avance en la manera de construir y la aparición de nuevos materiales como el acero y el hormigón, han dejado a un lado el uso tradicional del empleo de la madera para la construcción de viviendas.

La evolución de los propios materiales y de las técnicas constructivas, así como su disponibilidad temporal y/o geográfica han marcado el uso de diferentes tipologías de forjado.

El objetivo de este capítulo es definir qué es un forjado y las funciones que tiene, siempre desde un punto de vista enfocado a forjados de madera, además de establecer posibles tipologías de forjados y mostrar una reseña de la evolución que ha sufrido el forjado de madera durante la historia de la construcción en viviendas.

1.1 Definición de forjado

Para elaborar la definición de forjado me he apoyado en el Dr. Ingeniero de Caminos José Calavera Ruiz, en cual lo describe como “un elemento estructural, generalmente horizontal, que recibe las cargas directamente y las transmite a los restantes elementos de la estructura. Adicionalmente, el forjado materializa la separación entre plantas consecutivas y desempeña otras funciones como aislamiento entre plantas y soporte de acabados e instalaciones”. (Calavera, 2002).

1.2 Funciones del forjado

Distinguiremos dos funciones principales del forjado, definidas de esta misma manera por el profesor Luis Felipe Rodríguez Martín (1991):

- Ser resistentes.
- Separación entre plantas.

1.2.1 Función resistente

Debido a su situación como elemento estructural el forjado tiene que:

- Soportar las acciones gravitatorias que inciden directamente sobre él, transmitiéndolas a los elementos sustentantes sobre los cuales se apoya.
- Recoger y distribuir las fuerzas que actúan sobre él entre los soportes. Los forjados además de resistir las acciones gravitatorias, deben soportar acciones como el sismo, el viento, el empuje de tierras y en estos casos, actúa ante ellos como una viga de gran canto capaz de transmitir adecuadamente sus efectos a los soportes.

- Arriostrar los diferentes pórticos, si no hubiera un enlace entre los pórticos paralelos de una estructura, se podría producir un posible abatimiento de los pórticos.
- Impedir el pandeo lateral de las vigas.
- Ayudar frente a torsiones de las vigas.

1.2.2 Función separadora

Los forjados dividen el edificio en plantas, separando y aislando unas de las otras. Atendiendo a esto, el forjado debe:

- Proporcionar aislamiento acústico suficiente entre plantas consecutivas, procurando limitar la transmisión de los sonidos entre ella y amortiguando los ruidos de los impactos que actúen sobre el forjado.
- Ser capaz de impedir la propagación del fuego a través de él, actuando como elemento compartimentador durante el tiempo establecido en la normativa vigente.
- Contribuir al aislamiento térmico entre espacios interiores con diferentes temperaturas, y entre éstos y el exterior.
- En ciertos casos es conveniente que el forjado sea lo más estanco posible en previsión de fallos de la impermeabilización.

1.3 Tipologías de forjados.

Los forjados se pueden realizar de múltiples maneras, atendiendo a muy diversos factores que condicionan su ejecución. Teniendo en cuenta esta variedad, establecemos las siguientes clasificaciones:

1.3.1 Según el sistema de transmisión de cargas

En forjados de madera la transmisión de cargas se realiza en la mayoría de los casos en una dirección, así se puede concretar que son forjados unidireccionales, flectan básicamente en una dirección y transmiten las cargas a las vigas, y éstas, a los soportes.

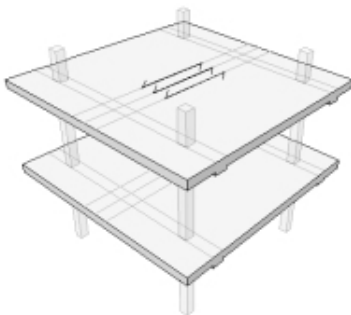


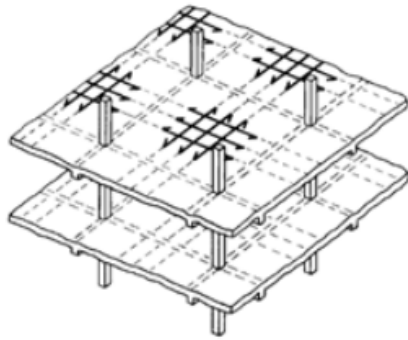
Ilustración 1. Representación de transmisión de cargas forjado unidireccional.
Fuente: (Calavera, 2002)



Ilustración 2. Forjado unidireccional madera.
Fuente: Propia

Con la aplicación de la madera laminada aparecen los primeros forjados bidireccionales elaborados con madera, estos flectan en

dos direcciones y transmiten las cargas a las vigas, o bien directamente a los soportes, en dos direcciones.



*Ilustración 3. Representación de transmisión de cargas forjado bidireccional.
Fuente: (Calavera, 2002)*



*Ilustración 4. Forjado bidireccional madera.
Fuente: <http://goo.gl/ZJmi3o>
(28/04/2015; 12:42)*

1.3.2 Según el sistema de ejecución

Forjados prefabricados: son los formados por elementos prefabricados autorresistentes, que aportarán una resistencia parcial que debe ser completada mediante la vinculación con el resto de elementos portantes, dicha unión se realiza con fijaciones “in situ”, necesarias para que el forjado pueda soportar la totalidad de las cargas.

Estos forjados presentan una mayor rapidez en su puesta en obra, ya que se elaboran con un menor número de elementos. En la mayoría de las ocasiones, es un único elemento modular el que conformará el forjado, así se consiguen reducir las operaciones a realizar en la obra. La resistencia de los elementos viene garantizada por el fabricante.

Los elementos prefabricados, en dichos forjados, cumplen funciones distintas según la fase de construcción. Durante la fase de ejecución deben ser capaces de resistir por flexión su propio peso. Una vez adquirida la resistencia suficiente tras las fijaciones finales que completen la rigidez necesaria del forjado, los elementos prefabricados dejan de ser piezas individuales pasando a conformar un único elemento.

Forjados “in situ”: se puede considerar como “in situ” a aquellos que son los realizados en obra con los elementos tradicionales de vigas y viguetas, ya que en este caso su construcción requiere mayor elaboración en obra que los prefabricados.



*Ilustración 5. Forjado de madera “in situ”.
Fuente: <http://goo.gl/jWuEcE> (28/04/2015; 13:52)*



*Ilustración 6. Forjados de madera prefabricados.
Fuente: <http://goo.gl/na2cdP> (28/04/2015; 13:52)*

1.3.3 Según el grado de hiperestatismo

En la mayoría de las situaciones, el uso de la madera en la realización de forjados, se orientaba a establecer sistemas biapoyados.

Con la posterior aparición de nuevos materiales de madera, que buscaban cubrir mayores luces, se obtuvieron elementos que permitían la elaboración de forjados continuos.

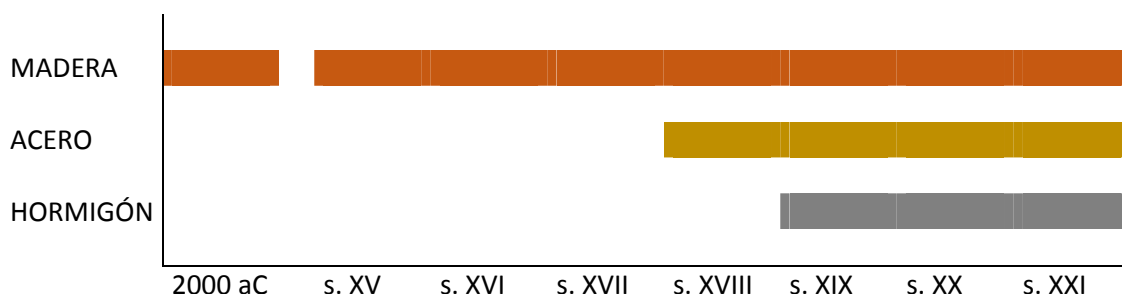
1.4 Evolución de los forjados de madera.

Los forjados se han construido de muy diversas maneras y con distintos materiales a lo largo de la historia en función de la técnica y los materiales que se conocía en el momento.

La abundancia de madera en ciertos lugares del mundo, su versatilidad y eficacia para trabajar a tracción y flexión hicieron de ella un material imprescindible en la construcción hasta la aparición del acero laminado y el hormigón. Igualmente, la ausencia de piedra en muchas zonas, y la destreza de los carpinteros capaces de crear unas estructuras de enorme complejidad y riqueza formal, muy atractivas a los ojos de sus contemporáneos, impulsaron su empleo.

Actualmente los forjados pueden estar contruidos con diversos materiales, pero en la antigüedad como se mencionó anteriormente, tan solo se utilizó como material principal la madera para su ejecución. En el grafico siguiente se muestran los distintos tipos de materiales usados en el transcurso de los siglos.

Figura 1. Empleo de materiales en los forjados a lo largo de la historia. (Vicente Navarro, Junio 2009)



La primera forma de construir los forjados, durante cientos de años, fue la de vigas simplemente apoyadas sobre muros de carga. En esta parte del capítulo se pretende mostrar la evolución en los forjados de madera usados para edificaciones de viviendas a lo largo de los siglos. Partiremos de los forjados antiguos hasta los más actuales, donde observaremos los nuevos sistemas que gracias a la evolución tecnológica se han alcanzado.

Se tiene constancia de que en ciudades de Mesopotamia, alrededor del año 2000 a.C., ya existían casas de dos plantas dentro de sus murallas con el uso de forjados de vigas de madera que apoyaban sobre muros de ladrillo.

En Egipto, cuna de aplicación de numerosos materiales constructivos, se conoce de viviendas de planta baja más dos pisos, donde la realización de forjados era mediante troncos de madera de bambú y palmera de baja calidad apoyados sobre muros.

La técnica fue evolucionando y en las culturas micénica y griega se construían casas de uno y dos pisos con soportes internos de vigas y pilares, prescindiendo así de algún muro de carga.

En la ciudad de Roma se presenta la evolución de la tecnología griega. La reducción de escuadrías observada en las cerchas se extiende a evolucionados forjados que configuraban los dos tipos de viviendas principales de esa época: la Domus y las insulaes. Dado su alto número de habitantes, se pretendió dar cobijo a las gentes con una especie de apartamentos de muy mala calidad, llamados insulaes, pero que mediante muros de ladrillo y forjados y escaleras de madera llegaron a alcanzar seis plantas.

Los forjados de viviendas en la Edad Media son entramados vistos, al igual que el resto de la estructura. Así se le dará gran importancia a la busca de soluciones que guarden una estética agradable a la vista.

La arquitectura japonesa por su gran tradición maderera también influye en la evolución de los forjados. Su búsqueda hacia la perfección da lugar a soluciones de unión entre estructuras sin el empleo de elementos metálicos, consiguiendo una gran riqueza en los detalles constructivos.

Será en el Renacimiento, época de transición entre la edad media y la edad moderna, cuando con la aparición de leyes de cálculo, traídas por grandes figuras como Da Vinci con su mecánica estática y Galileo con el estudio de la flexión, harán que las vigas pasen de cilíndricas a rectangulares. Se producirá en esta época el despunte de la carpintería de armar.

Además en este tiempo se empieza a utilizar la madera en sistemas estructurales para salvar grandes luces. Arquitectos como Giorgio Vasari y Andrea Palladio darán un giro al uso de la madera en sistemas estructurales, disponiendo el material de modo que los elementos soporten mayores esfuerzos de flexión y tracción; consiguiendo así grandes estructuras que lograban cubrir luces de aproximadamente doce metros.

En la Edad Moderna, gracias a la industrialización, se produce la optimización de las estructuras de madera en aspectos como la funcionalidad y la estética. Los adelantos tecnológicos y la producción en serie de elementos para la construcción, traen a mediados de este siglo el concepto de la prefabricación.

En esta época la madera perderá su papel protagonista en la construcción debido al surgimiento de otros materiales como son el acero y el hormigón.

El ingeniero Bernard Forest de Belidor constituye una pieza clave en esta época histórica ya que propondrá nuevas reglas de dimensionamiento para piezas de madera, a partir de aquí los elementos estructurales adquieren dimensiones más esbeltas que las antiguamente utilizadas.

Ya en la Edad Contemporánea se produciría el culmen en la evolución de estructuras en madera. La construcción seguía consumiendo madera y cada vez el ansia por salvar grandes luces demandaba mayores escuadrías. Los constructores de castillos, catedrales, iglesias, conventos, etc., acabaron encontrando dificultades para obtener las escuadrías necesarias de los árboles disponibles.

Es entonces cuando aparecen constructores como Philibert Delorme que aplicando el concepto que conocía: la forma en arco, la cual salvaba grandes luces, mediante piezas cortas comprimidas de piedra, lo lleva a la carpintería de madera y crea su primera obra en el castilló de la Murette (1548) y después en el castillo de Montceaux.

Tres siglos después, el Coronel Emy, Director de Fortificaciones de Bayona, idea el sistema que lleva su nombre. Se trata de láminas de madera colocadas horizontalmente y ensambladas por bulones y bridas metálicas. Pero será Otto Hetzer, maestro carpintero en Ewimar (Suiza) el que tuvo la genial idea, hacia 1906, retomando el

sistema Emy, y gracias a los progresos de la química moderna, de sustituir los bulones y bridas metálicas por colas tipo caseína, obteniendo así una sección prácticamente homogénea. Se produce el nacimiento de la madera laminada encolada, lo que proporcionara un gran cambio en la ejecución de los forjados y en las estructuras de madera en general.

Concluyendo, desde la aparición de los primeros forjados, la mayoría de éstos fueron solucionados con el uso de la siguiente tipología estructural: muros de carga y vigas de madera simplemente apoyadas.

Los forjados de madera, aunque de un cierto peso, proporcionaban una escasa rigidez horizontal a los edificios debido a la simpleza y precariedad de sus apoyos que principalmente eran de 3 maneras:

- Mediante la colocación de la viga dentro de un hueco en el muro dispuesto para ésta función.
- Apoyo sobre ménsulas cortas de piedra, muy próximas entre sí, una jácena sobre la que colocar las viguetas, para así evitar el uso de tantos huecos.
- El uso de huecos en el muro, pero más separados dónde colocar unas jácenas que recogen las viguetas de madera.

Así pues, el esquema estático utilizado ha sido fundamentalmente el de viga biapoyada. Ya fuera dentro del muro o sobre otro elemento, como son las ménsulas salientes del muro o las jácenas.

1.4.1 Sistemas históricos.

Los primeros forjados de piso, estructuras horizontales que forman el techo de una estancia y son al mismo tiempo los suelos de la superior, estaban contruidos con una sucesión de vigas apoyadas en la coronación de dos muros paralelos, que sirven de apoyo a todos los elementos. La separación entre viga y viga era variable y sobre ellas se cuajaba el suelo por medio de otros órdenes de vigas, tablazón o ladrillos.

En la constitución del suelo, el carpintero podía optar por dos métodos: el empleo de grandes vigas madres o jácenas, sobre las que apoyar un segundo o un tercer orden de vigas perpendiculares entre sí; o bien, realizar el suelo con numerosas vigas de menor sección. En ambos casos la necesidad de disminuir el grosor de las vigas, para abaratar su coste, obligó a los carpinteros a idear refuerzos laterales para aumentar su resistencia, nacen así las ménsulas y los jabalcones, los cuales poseían decoración tallada o pintada.

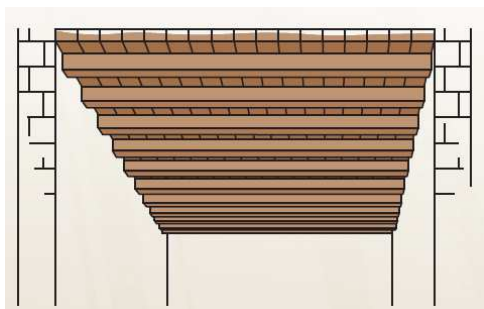


Ilustración 7. Forjado de piso de un orden de vigas.

Fuente: (Vasallo Toranzo et al. , 2010)

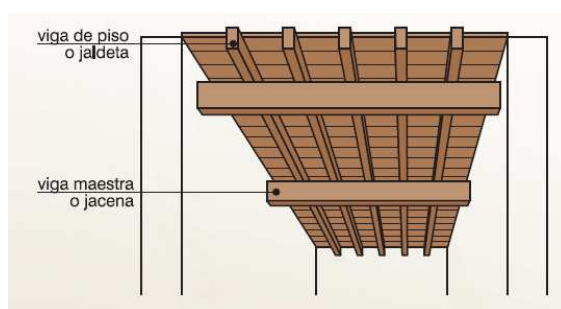


Ilustración 8. Forjado de piso de dos órdenes de vigas.

Fuente: (Vasallo Toranzo et al. , 2010)

Con el paso del tiempo la madera empezó a escasear, ya no era tan abundante y por lo tanto la manera de construir también se vio afectada. Se pasó de usar la madera exclusivamente, a mezclarla con otros materiales como los ladrillos, los yesos, etc.

A continuación se presentan los tipos de forjados que eran utilizados con más regularidad en la antigüedad, como es el caso de: revoltones, casetonados, entablados y forjados de rasilla.

El gran desarrollo de los forjados con revoltones tiene su inicio a partir del siglo XVIII, cuando empieza a escasear la madera. Los entablados y los forjados de rasilla se desarrollaron sobre todo alrededor del 1500. La distribución de los casetonados es regular a lo largo de los siglos, porque, aun siendo una técnica bastante antigua, se adapta fácilmente a diferentes salas y funciones, ya que pueden ser forjados muy simples o ser el resultado de una importante decoración pictórica.

1.4.1.1 Revoltones

Es una técnica muy extendida porque no necesita gran cantidad de madera para su realización y su ejecución es bastante sencilla.

Su construcción comienza con el apoyo de las vigas y a partir de ahí se construyen las bovedillas sin necesidad de cimbra, simplemente juntando los ladrillos con yeso y cerrando la estructura con una clave que a veces es medio ladrillo.

En un primer momento las vigas eran simples rollizos, que posteriormente con la labra de la madera fueron transformándose en secciones rectangulares o cuadradas. Los revoltones también pueden estar hechos solamente con un conglomerado de yeso en el que se suelen notar las marcas de posibles encofrados que apuntalaban desde abajo.

Las vigas pueden ser una única pieza con muescas recortadas para apoyar las bovedillas, o pueden estar compuestas de un alma central y dos listones laterales clavados a ella. La segunda solución es posterior a la primera, ya que permite ahorrar material y el uso de clavos sólo pudo crecer cuando su producción empezó a ser industrial. Los clavos se disponen a una distancia de 10 a 20 cm entre ellos y a menudo no se colocan en la misma línea horizontal sino en zigzag.

También apareció posteriormente una variante de esta categoría, donde se colocan las vigas giradas a 45°; esta configuración presentaba la ventaja de no necesitar muescas para apoyar las bovedillas pero, en cambio, el apoyo en los muros necesita un aparejo específico.

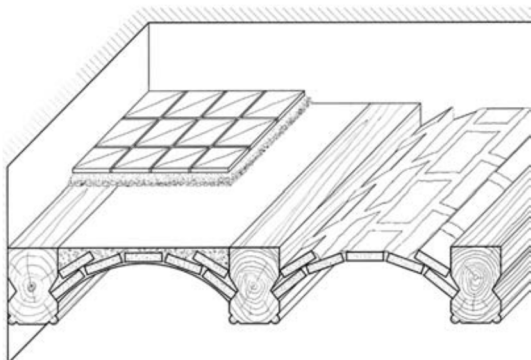


Ilustración 9. Axonometría forjado de revoltones.
Fuente: (Diodato, 2009)

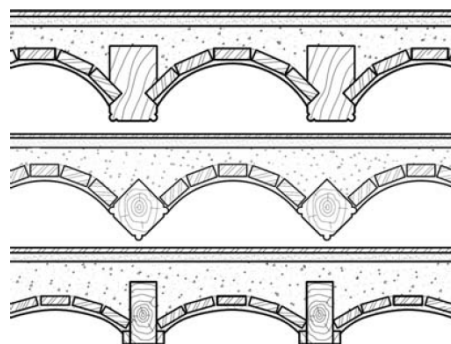


Ilustración 10. Secciones forjados con técnica de revoltones.
Fuente: (Diodato, 2009)

1.4.1.2 Los casetonados

Los casetonados y los entablados, se conocen bajo el término genérico de alfarjes¹. El casetonado consiste en una serie de vigas sobre las que están clavadas dos series de elementos: las cintas, listones de unos tres metros perpendiculares a las vigas, y los saetinos, paralelos a las mismas y más cortos.

Estos componentes derivan de la necesidad de poner un tapajuntas entre las tablas para subsanar el problema de la contracción de las vigas durante la maduración, y la consiguiente separación entre tablas y desprendimiento de parte del relleno. Desde un punto de vista estructural, la presencia de las cintas que atan el entramado, mejora notablemente el comportamiento bidireccional del forjado, aumentando su estabilidad. Sobre esta estructura descansa el entablado. El relleno podía ser desde una mezcla de cal o yeso a simple tierra. El conjunto está rematado por unas tablillas verticales perimetrales que se insertan en ranuras marcadas en las caras laterales de las vigas, que sirven, junto con la cornisa, para ocultar el encuentro de éstas con el muro.

1.4.1.3 Entablados

Los entablados son las estructuras más simples para realizar un forjado, ya que una vez colocadas las vigas, simplemente se clava sobre ellas una tablazón. El material de relleno puede ser, como en el caso de los casetonados, una masa de cal, yeso o de tierra que hace la función de un mínimo aislamiento acústico.

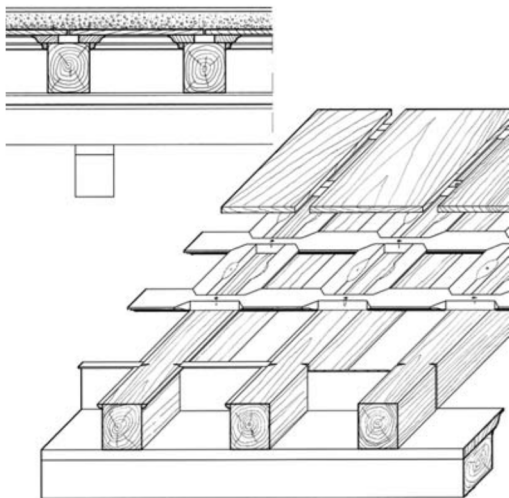


Ilustración 11. Axonometría y sección de un forjado de casetones.
Fuente: (Diodato, 2009)

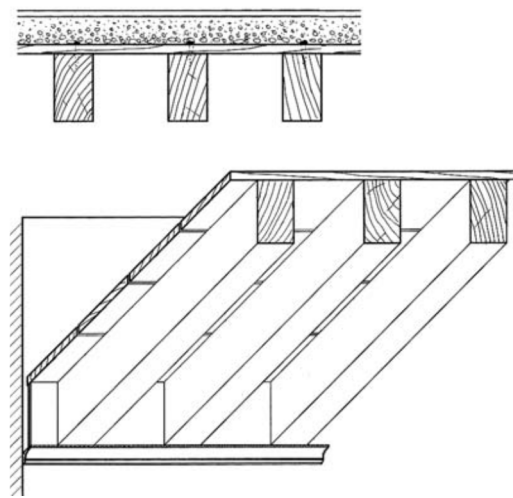


Ilustración 12. Axonometría y sección de forjado entablado. Fuente: (Diodato, 2009)

¹ Alfárje: es un techo de madera horizontal y entrelazada que en muchos casos se labra y se pinta adicionalmente. El techo de alfarje se utilizó fundamentalmente en la arquitectura mudéjar y musulmana.

1.4.1.4 Forjados de rasillas

Los elementos que constituyen el forjado de rasilla son las vigas, los listones perpendiculares y los ladrillos. Los listones, con una sección rectangular de unos siete centímetros por cuatro centímetros, de tamaño suficiente para soportar el elemento cerámico que descansa sobre ellos con un relleno de una masa de cal o yeso encima.

Este tipo de forjado no es muy abundante ya que por su estructura presenta un elevado peso, lo que provoca una aceleración en los procesos de deformación en vigas y viguetas.

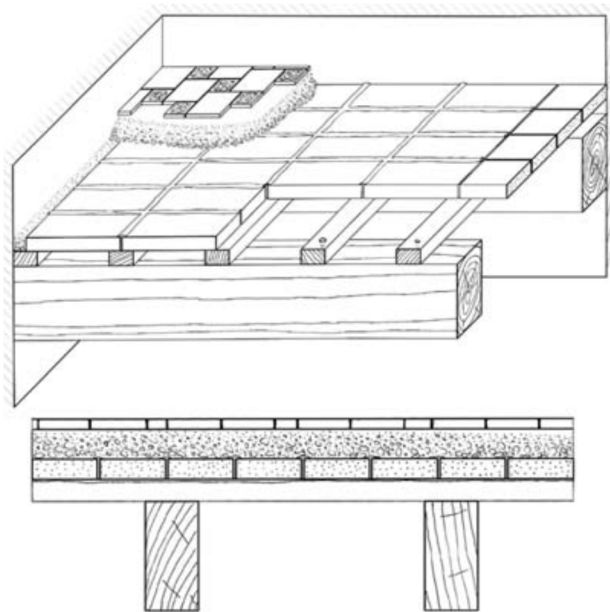


Ilustración 13. Axonometría y sección de forjado de rasilla. Fuente: (Diodato, 2009)

1.4.2 Sistemas actuales.

La construcción en madera como consecuencia de la industrialización dará un gran cambio en cuanto a la forma de emplearla en la edificación. Se pasa de usar madera maciza a conseguir láminas de madera de espesores de 1mm, que unidas mediante colas aportaran nuevas estructuras con multiplicidad de ventajas.

A lo largo de la historia la madera como material sufrió altibajos en cuanto a su empleo. En la Edad Media se produciría un elevado perfeccionamiento y desarrollo estructural en la técnica maderera. La posterior llegada de la revolución industrial significó también un hito en el empleo de este material, que había perdido protagonismo con la aparición del acero y el hormigón, además de verse afectado por la escasez del mismo en prácticamente toda Europa.

A finales del siglo XIX vuelve a recuperar su valor y el auge perdido hasta el día de hoy. Este despunte se debe a la utilización de colas y resinas sintéticas que hicieron posible las unidades estructurales continuas, constituidas por pequeños elementos de madera, incluso con diferentes propiedades.

Gracias pues a la aparición de la madera laminada, este material pasó a ser considerado entre los materiales de alta resistencia, siendo posible realizar vigas compuestas y estructuras de grandes luces.

Como primera experiencia conocida sobre el uso de la madera laminada encolada en Europa se puede mencionar la construcción de un auditorio en Basilea (Suiza). En un principio las estructuras de madera laminada solo se realizaban planas, fue a principio del siglo XX cuando empiezan a aparecer las cubiertas de directriz curva.

Así pues con todos estos avances sobre la madera aparecen productos como los sistemas prefabricados de madera de alta eficacia, que permiten desarrollar construcciones diáfanas, ganando espacio y generando mayores volúmenes. Estos sistemas aportan facilidad y rapidez constructiva, además de garantías sobre resistencias y estabilidad dimensional selladas por los fabricantes.

Se describen a continuación algunos sistemas patentados usados en la actualidad para la realización de forjados: sistemas en cajones, tableros contralaminados y otras soluciones.

1.4.2.1 Sistemas en cajón.

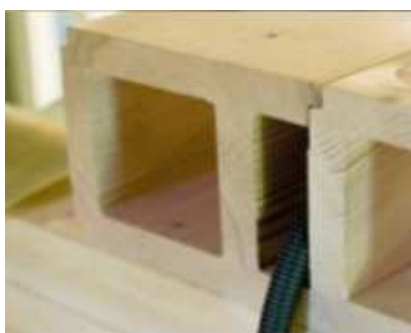


Ilustración 14. Módulo sistema en cajón. Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 12:59)

Sistema de forjado de madera maciza, cuyo nacimiento se sitúa en Suiza, construido como piezas en cajón, que son ligeros y salvan grandes vanos, permitiendo luces comprendidas entre 9-12 m. Son elementos nervados de madera de gran capacidad portante.

Como ejemplo señalar la marca comercial *LIGNATUR*, ésta presenta varias composiciones diferentes en la conformación del forjado, según el tipo de cajón elegido, para resolver con mayor solvencia las necesidades que vengan definidas en los proyectos de construcción.

Este es el modelo estándar que presenta buena capacidad portante, soportando grandes luces (con un límite de 12 m).



Ilustración 15. Modelo estándar sistema *LIGNATUR*.

Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 12:59)

Si pretendemos obtener cierta resistencia contra fuego o mejorar el aislamiento acústico, se buscan pequeñas modificaciones en su estructura estándar como aumentar la sección de la cara expuesta al fuego o añadir otros elementos (paneles aislantes) que contribuyen en la obtención de las especificaciones establecidas.



Ilustración 16. Modelo que presenta mayor resistencia al fuego hasta REI 90. Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 13:04)

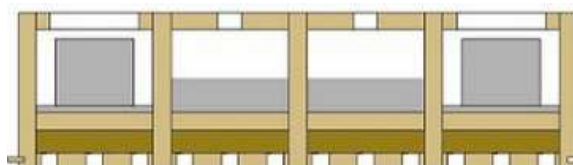


Ilustración 17. Modelo que permite la combinación de todas las funciones necesarias: estructural, resistencia al fuego, aislamiento... Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 13:04)



Ilustración 18. Montaje forjado con paneles LIGNATUR. Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 13:04)

1.4.2.2 Tableros contralaminados.

Estos paneles son un sistema estructural prefabricado de madera laminada. Se fabrican a partir de planchas de madera secadas al horno, que se apilan en ángulo recto y pegadas entre sí sobre toda su superficie. Dependiendo de la finalidad y los requisitos estáticos, podemos encontrar paneles de 3 a 7 capas. El rango de luces libres está entre 8 y 16 m.

La resistencia y la estabilidad dimensional que llegan a alcanzar estos elementos son comparables a las del hormigón. Aporta también grandes ventajas a nivel de aislamiento térmico y aislamiento acústico debido a sus espesores. Y actualmente hay estudios de laboratorio que confirman que la construcción a base de tableros contralaminados en zonas sísmicas ha dado valoraciones positivas.

Como ejemplo de este sistema se encuentran marcas comerciales: KLH, EGO_CLT™, Stora Enso.



Ilustración 19. Paneles KLH. Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 16:34)



Ilustración 20. Montaje del forjado mediante paneles de madera contralaminada. Fuente: <http://goo.gl/MIqjCI> (25/03/2015; 10:25)



Ilustración 21. Edificación con forjado de paneles KLH. Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 16:34)

1.4.2.3 Otras soluciones.



Ilustración 22. Paneles prefabricados KIELSTEG. Fuente: <http://goo.gl/GgFizy> (25/03/2015; 16:34)

Las prestaciones mostradas por los sistemas de forjados de madera de sección en cajón, ha llevado al desarrollo de otras soluciones que permiten potenciar el sistema. Un ejemplo de ello es el sistema austriaco KIELSTEG. Está hecho con paneles prefabricados consistentes en dos plataformas de madera conectadas por un zigzag de contrachapados o de OSB, dando como resultado unos elementos estructurales de gran resistencia, ligeros, y que además ayudan a una construcción sostenible.

La curva que aparece en los contrachapados, que actúan de alma del panel, es como la de la quilla de los barcos, aportando gran estabilidad a estos prefabricados, y permitiendo luces de hasta 30 metros. El rango habitual de luces libres está entre 5 y 27 m.

Estos paneles vienen de taller ya cortados y listos para ser puestos en obra simplificando la construcción de los forjados del edificio y aportando buenas cualidades para su aislamiento, tanto térmico como acústico. Sus cámaras de aire ayudarán luego para el paso de cables de las instalaciones.



Ilustración 23. Colocación de los módulos KIELSTEG. Fuente: <http://goo.gl/xxOS6f> (25/03/2015; 16:34)

2. Patologías en estructuras de madera.

2.1 El material

El conocimiento sobre la naturaleza de la madera, características y comportamiento, es necesario para establecer y efectuar un buen uso de este material.

Si hacemos un corte transversal a un árbol, podemos analizar desde el exterior hacia el interior una sección de éste, y así apreciar las zonas claramente diferenciadas de las que se compone y cuáles son sus funciones específicas.

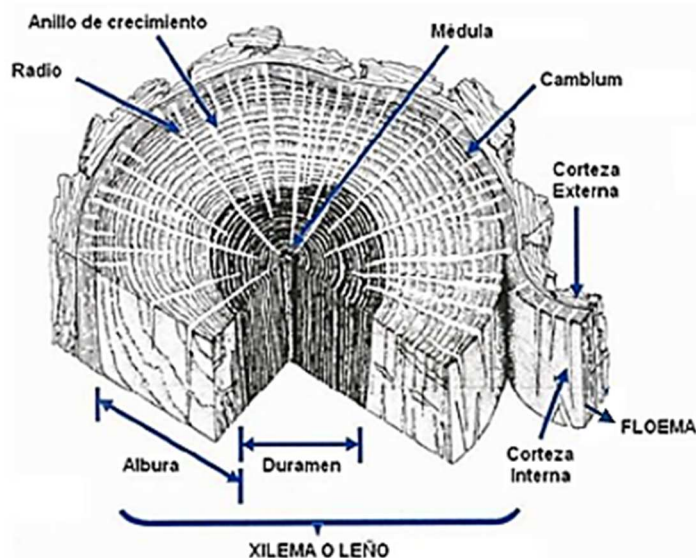


Ilustración 24. Partes de la madera.

Fuente: <http://goo.gl/sFAVTY> (27/03/2015; 10:29)

La primera zona apreciable es la corteza, formada por materia muerta, de aspecto resquebrajado, que se divide en corteza exterior y corteza interior (floema).

La corteza exterior, compuesta de células muertas, tiene como función la de proteger la estructura interior frente a los agentes tanto climáticos como biológicos.

La corteza interior, compuesta por células, es la encargada de trasladar la savia elaborada.

Luego se presenta el cambium, que es el tejido generador de

células, lugar donde se produce el crecimiento del árbol. Hacia el interior forma el xilema y hacia el exterior, forma el floema.

En el xilema se encuentra la albura hacia el exterior, con células que cumplen la función de sostén y traslado de agua y nutrientes. Y hacia el interior se forma el duramen, compuesto por células inactivas, pero que mantienen la función de sostén.

Por último, en el centro del árbol tenemos la médula, tejido inactivo sin función específica.

En la madera otro de los elementos que tiene una especial relevancia, en cuanto a su clasificación o en su empleo, son los denominados anillos de crecimiento. Los anillos en las coníferas se observan perfectamente diferenciados, además de poder apreciar dos bandas concéntricas, donde la banda más clara es denominada madera de primavera o temprana y la banda más oscura, más densa que la de primavera, es la madera de verano o tardía. Por otra parte en las maderas denominadas frondosas los anillos no presentan tal facilidad para su apreciación. En cuanto a la influencia de los anillos en el empleo de la madera se refleja a la hora del secado y en la anisotropía, pues se produce una contracción derivada del sentido de los anillos, provocando deformaciones en las piezas de madera.

2.1.1. Propiedades básicas.

Independientemente de la especie, la madera presenta propiedades como son la anisotropía y la higroscopicidad.

La madera como material *anisótropo*, según sea el plano o dirección que se considere respecto a la dirección longitudinal de sus fibras y anillos de crecimiento, el comportamiento tanto físico como mecánico del material, presenta resultados diferentes. Para tener una idea de la gran disparidad de su comportamiento, la madera resiste entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal.

Por dicho comportamiento estructural tan desigual, se ha hecho necesario establecer los ejes tangencial, radial y axial o longitudinal.

- El eje tangencial, es tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular al eje longitudinal de la pieza.
- El eje radial es perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal.
- El eje longitudinal es paralelo a la dirección de las fibras y por ende, al eje longitudinal del tronco. Forma una perpendicular respecto al plano formado por los ejes tangencial y radial.

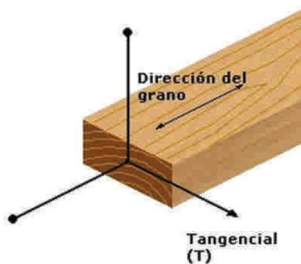


Ilustración 25. Eje tangencial.
Fuente: <http://goo.gl/cMbgB6>
(27/03/2015; 11:21)

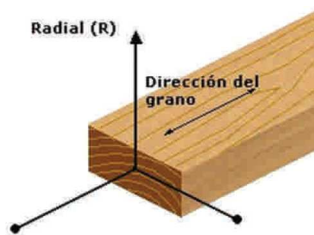


Ilustración 26. Eje radial.
Fuente: <http://goo.gl/cMbgB6>
(27/03/2015; 11:21)

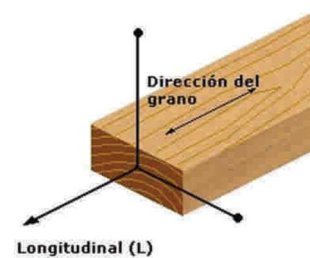


Ilustración 27. Eje longitudinal.
Fuente: <http://goo.gl/cMbgB6>
(27/03/2015; 11:21)

La madera como material *higroscópico*, tiene la capacidad de captar y ceder humedad en su medio, proceso que depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente. Este comportamiento es el que determina y provoca cambios dimensionales y deformaciones en la madera.

2.1.2. Propiedades físicas.

Contenido de humedad: Es la cantidad de agua presente en la madera. Este valor incrementa con la humedad relativa del aire y decrece con la temperatura. Cuando el contenido de humedad de una madera está en equilibrio con el aire se denomina contenido de humedad en equilibrio. La estructura de la madera almacena una importante cantidad de humedad.

Para determinar la humedad en la madera, se establece una relación entre masa de agua contenida en una pieza y masa de la pieza anhidra, expresada en porcentaje. A esto se le conoce como contenido de humedad.

$$\% \text{ Contenido de humedad} = (\text{peso del agua} \times 100) / \text{peso de madera seca en cámara}$$

Donde: Peso del agua = Peso madera húmeda - Peso madera seca en cámara.

Densidad de la madera: es la razón entre la masa y el volumen que ocupa la pieza a estudiar. Pero en la madera hay que tener en cuenta su cualidad higroscópica, ya que la masa y el volumen varían con el contenido de humedad; por lo que resulta importante expresar la condición bajo la cual se obtiene la densidad.

Esta es una de las características físicas más importantes, ya que está directamente relacionada con las propiedades mecánicas y la durabilidad de la madera, a mayor densidad mayor resistencia.

Merma e hinchazón de la madera: Son los cambios dimensionales, ya sea en sentido radial, tangencial y longitudinal, como consecuencia del cambio de su contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras. La causa es la salida o el ingreso del agua higroscópica de la pared celular; el agua libre no tiene influencia.

El punto de saturación de la fibra es una variable muy importante, por encima de él la madera no varía sus características, en cambio si la madera se encuentra bajo dicho punto, hay cambios dimensionales y volumétricos.

El secado de la madera por debajo del punto de saturación de la fibra, provoca pérdida de agua en las paredes celulares, produciéndose contracción de la madera.

Propiedades eléctricas: La madera anhidra es un excelente aislante eléctrico, esta propiedad se ve afectada por la humedad, con el aumento en el contenido de humedad esta propiedad disminuye su eficacia.

Propiedades acústicas: La madera tiene la capacidad de amortiguar las vibraciones sonoras. Su estructura celular porosa transforma la energía sonora en calórica, debido al roce y resistencia viscosa del medio, evitando de esta forma transmitir vibraciones a grandes distancias.

Propiedades térmicas: El calor en la madera depende de la conductividad térmica y de su calor específico, la combinación de estos dos aspectos hace de la madera un material que absorbe calor muy lentamente.

Esta alta resistencia que ofrece la madera al paso del calor, la convierte en un buen aislante térmico y en un material resistente a la acción del fuego.

2.1.3. Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas de la madera determinan la capacidad o aptitud para resistir fuerzas externas, entendiendo por fuerza externa cualquier sollicitación que, actuando exteriormente, altere su tamaño, dimensión o la deforme.

La orientación de las fibras que componen la madera dan lugar a la anisotropía de su estructura, por lo que a la hora de definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular (que engloba la radial y la tangencial) y la dirección paralela a la fibra. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

Los árboles están diseñados por naturaleza para resistir con eficacia los esfuerzos a los que van a estar sometidos en su vida; principalmente los esfuerzos de flexión producidos por la acción del viento y los de compresión producidos por las acciones gravitatorias.

A continuación se recogen las características más significativas de las propiedades mecánicas de la madera estructural.

Resistencia a la flexión: Capacidad de la madera para resistir cargas de flexión o doblado, cuando se aplican en dirección perpendicular a las fibras. Esto sucede cuando se utiliza la madera como vigas, viguetas, entablado, etc.

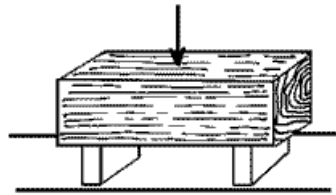


Ilustración 28. Flexión.

Fuente: <http://goo.gl/0bNaFS> (30/04/2015; 16:15)

Resistencia a la compresión: Capacidad de la madera para resistir fuerzas externas que tienden a acortar o disminuir la longitud de la madera, por ello se dice que la madera está comprimida o en compresión. Esta resistencia se puede dar en dos direcciones, de forma paralela o perpendicular a las fibras:

- **Compresión paralela a la fibra:** ocurre cuando una fuerza actúa de manera paralela a las fibras y corresponde a la resistencia que opone la madera a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de la fibra. La madera posee una elevada resistencia a este esfuerzo. (il. 29)
- **Compresión perpendicular a la fibra:** ocurre cuando la fuerza solicitante actúa en dirección perpendicular a las fibras y corresponde a la resistencia que opone la madera a una carga aplicada en sentido perpendicular a la dirección de las fibras. La resistencia en este caso es muy inferior a la paralela. (il. 30)

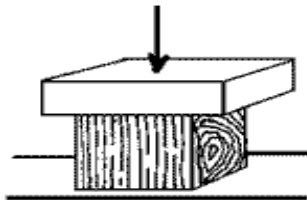


Ilustración 29. Compresión paralela a la fibra.
Fuente: <http://goo.gl/0bNaFS> (30/04/2015; 16:15)

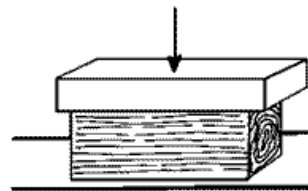


Ilustración 30. Compresión perpendicular a la fibra.
Fuente: <http://goo.gl/0bNaFS> (30/04/2015; 16:15)

Resistencia a la tracción: Capacidad de la madera para resistir fuerzas externas que tienden a estirla, mediante la aplicación de dos fuerzas que actúan en la misma dirección pero en sentido opuesto. Al igual que en la compresión se puede dar en dos direcciones:

- **Tracción perpendicular a la fibra:** La fuerza solicitante actúa en dirección perpendicular a las fibras. La madera posee una muy baja resistencia en este sentido, debido a la escasa cantidad de fibras y la falta de trabazón transversal entre ellas longitudinalmente. (il. 31)
- **Tracción paralela a la fibra:** La fuerza actúa de manera paralela a las fibras. En esta situación la madera presenta una elevada resistencia. (il.32)

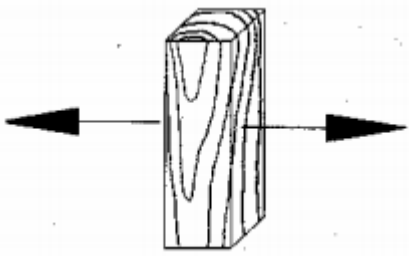


Ilustración 31. Tracción perpendicular a la fibra.
Fuente: (Vignote Peña & Martínez Rojas, Tecnología de la madera, 2006)



Ilustración 32. Tracción paralela a la fibra.
Fuente: (Vignote Peña & Martínez Rojas, Tecnología de la madera, 2006)

Cortante: es la capacidad de resistir fuerzas que tienden a que una parte del material se deslice sobre la parte adyacente a ella. Este deslizamiento se puede producir por:

- Las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. (il.33)
- Las fibras se deslizan con respecto a otras en dirección longitudinal. (il.34)
- Las fibras se deslizan por rodadura de unas fibras con respecto a otras. (il.35)

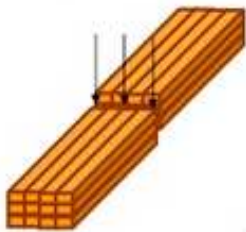


Ilustración 33. Tensiones tangenciales de cortadura.
Fuente: <http://goo.gl/0bNaFS> (30/04/2015; 16:15)

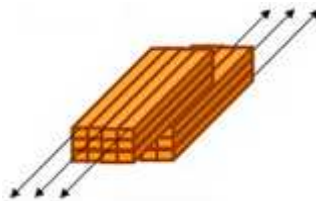


Ilustración 34. Tensiones tangenciales de deslizamiento.
Fuente: <http://goo.gl/0bNaFS> (30/04/2015; 16:15)

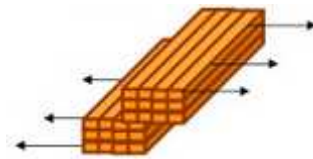


Ilustración 35. Tensiones tangenciales de rodadura.
Fuente: <http://goo.gl/0bNaFS> (30/04/2015; 16:15)

Dureza: Es la resistencia que presenta la madera a la penetración, así como a las abolladuras y al desgaste. Depende de su densidad, edad, estructura y si se trabaja en sentido de sus fibras o en el perpendicular.

2.2 Causas de patologías.

Tras este estudio del material, observando composición y propiedades que lo caracterizan, nos vamos a centrar ahora en las posibles vías de ataque por las que puede sufrir desgaste la madera.

Las causas del deterioro de la madera podemos clasificarlas en dos grandes grupos: las derivadas de los agentes biológicos y las que por el contrario provienen de los agentes abióticos. Aparte de estos grupos también conviene mencionar que en ciertas situaciones las patologías vienen producidas por el fuego y debido a causas estructurales.

2.2.1 Patologías de origen biótico

Analizaremos las causas patológicas teniendo en cuenta la siguiente clasificación de los organismos xilófagos²:

- Hongos xilófagos



Ilustración 36. Madera afectada por hongos
Fuente: <http://goo.gl/11snWO> (24/02/2015; 11:40)

Los hongos son vegetales de organización celular primitiva, cuya forma de vida se basa en alimentarse de materias orgánicas en descomposición. Se detectan por un color anormal de la madera, la degradación del material o por la presencia de insectos xilófagos que suelen acompañarlos.

El hongo se introduce en la madera mediante las hifas para recoger el alimento. Luego éste desprende esporas para reproducirse, las cuales pueden trasladarse a otras zonas mediante el viento o los animales. Las esporas pueden estar presentes en cualquier

ambiente por lo que su desarrollo es muy fácil. El factor más importante en referencia a su comportamiento es su dependencia de la humedad. El contenido mínimo de humedad que permite su desarrollo es del 18 al 20%. La madera que está expuesta a valores superiores podrá ser atacada por los hongos, por el contrario si el contenido de humedad es inferior el ataque no puede desarrollarse.

Dentro de este grupo podemos clasificar en dos subgrupos: uno engloba los mohos y los hongos cromógenos y en el otro se sitúan los hongos de pudrición.

Los mohos y los hongos cromógenos se alimentan de las sustancias de reserva de la madera y no producen degradaciones en la pared celular, por lo que no afectan a las propiedades mecánicas. Su efecto es el cambio de la coloración de la madera. Los más característicos son los hongos del azulado de la madera y el pasmo del haya. Aunque no son peligrosos por su mínima agresión a la madera, son indicadores de un mayor riesgo porque crean las condiciones necesarias para el desarrollo de los hongos de pudrición.

Los hongos de pudrición son los que causan graves daños en la madera, ya que se alimentan de los componentes de la pared celular llegando a destruirla por completo. Su efecto es la pérdida de densidad y resistencia acompañados de un cambio de coloración.

Hay pudriciones pardas o cúbicas, blancas o fibrosas y pudriciones blandas.

La pudrición parda es la más grave y peligrosa. Ésta se alimenta de celulosa y hemicelulosa y deja un residuo, que al secarse la pieza dicho material residual tiende a agrietarse formando estructuras de pequeños cubos o prismas que se disgregan con facilidad.

² Organismo xilófago: Cualquier tipo de organismo que se alimenta de madera viva o de madera muerta.

La pudrición blanca está producida por hongos que se alimentan de lignina preferentemente, aunque en menor grado también se alimentan de celulosa. La madera atacada toma un color blanquecino y presenta un aspecto fibroso. Normalmente se ven más afectadas las maderas frondosas que las coníferas, debido al mayor contenido de lignina.

La pudrición blanda se origina por hongos inferiores, que se desarrollan en el interior de la pared celular de las células de la madera, atacando la celulosa de la pared secundaria. La madera atacada presenta un aspecto final blando o esponjoso. Esta pudrición se produce en altas condiciones de humedad. (Arriaga et al, 2002)



Ilustración 37. Forjado de madera con pudrición parda.

*Fuente: <http://goo.gl/7iLj0I>
(24/02/2015; 11:50)*



Ilustración 38. Daños producidos por hongos de pudrición blanca.

*Fuente: <http://goo.gl/4nqISL>
(24/02/2015; 12:10)*



Ilustración 39. Daños por pudrición blanda.

*Fuente: <http://goo.gl/4nqISL>
(24/02/2015; 12:10)*

▪ Insectos de ciclo larvario



Ilustración 40. Daños producidos por insectos de ciclo larvario.

*Fuente: <http://goo.gl/hi6hdx>
(30/04/2015; 19:18)*

Los insectos de los que hablaremos en este apartado pertenecen al orden de los coleópteros. Su característica común es que se alimentan de la madera durante su etapa de larva.

Todo empieza cuando se depositan los huevos, y éstos dan lugar a pequeñas larvas que comienzan a alimentarse de la madera realizando galerías que disminuyen la capacidad resistente de la pieza. El tiempo que permanecen las larvas en la madera depende de su especie, siendo éste de meses hasta más de 10 años. Es durante este período cuando se producen daños en las piezas de madera.

Con el tiempo las larvas se transforman en pupa hasta alcanzar la metamorfosis, convirtiéndose así en insecto adulto, preparado para aparearse y reproducirse. Los orificios de salida en la superficie de la madera indican que al menos ha vivido dentro una generación, puesto que la larva se aproxima a la superficie para crear una cámara aislada donde se transformará en pupa.

Los principales coleópteros xilófagos que actúan en España y que atacan a la madera puesta en obra están constituidos por las familias siguientes:

1. Anóbidos (vulgarmente carcoma)

Son pequeños coleópteros de 3 a 11mm de longitud, en estado adulto. Por lo general, afectan a la albura y preferentemente con cierto contenido de humedad. Es habitual que su ataque acompañe al de los hongos de pudrición. Los orificios de salida son de forma circular con 1,5 a 4 mm de diámetro. Su ciclo de vida oscila entre 8 meses y 3 años.

2. Cerambícidos (carcoma grande)

Por lo general este insecto sólo se alimenta de la albura de la madera por lo que en piezas de gran contenido de duramen el daño es limitado. Las galerías son de forma ovalada, siguen la dirección de la fibra, están taponadas por serrín y presentan marcas o estrías en las paredes de las mismas.

El insecto adulto tiene una longitud de 10 a 20 mm, y el orificio de salida tiene forma elíptica con un diámetro de 6 a 12 mm. Su ciclo de vida oscila entre 2 y 10 años.

3. Lícidos (polilla)

Son insectos de tamaño pequeño (6 a 8 mm de longitud). Se alimentan de madera de albura de algunas especies de frondosas como roble, fresno y olmo. Las condiciones óptimas para su ataque corresponden a un contenido de humedad de un 16% y una temperatura de 25 °C. Los orificios de salida tienen forma circular con un diámetro aproximado de 1 a 2 mm. La duración de su ciclo biológico es de un año, debido a esta brevedad del ciclo de vida permite sucesivas infestaciones originando una rápida destrucción.

4. Curculiónidos (gorgojo de la madera)

Son insectos que por los signos de su ataque pueden confundirse fácilmente con el de los anóbidos. Atacan a la madera de albura de las frondosas y coníferas, aunque si ya hubiese ataques previos de hongos pueden afectar a la madera de duramen. Requieren una humedad en la madera mayor o igual al 20%. Las galerías que realizan son de sección circular y el orificio de salida es circular con un diámetro de 1 a 2 mm. El ciclo biológico es de 1 año a 2 años, según la especie.

5. Bostríchidos

Se alimentan de la madera de albura de las frondosas con alto contenido en almidón y con cierto grado de humedad. Realizan galerías circulares con diámetros de 3 a 6 mm. El insecto adulto tiene una longitud de 4 a 6 mm. Los orificios de salida son circulares con diámetros de 3 a 6 mm. Por las características del ataque pueden confundirse con los lícidos, pero éstos realizan los orificios de menor diámetro. La duración del ciclo biológico es de 1 año. (Arriaga et al, 2002).

▪ Insectos sociales (o termitas)

Las termitas son insectos del orden Isoptera que viven bajo una organización social avanzada. Constituyen una agrupación de individuos que incapaces de sobrevivir en solitario, desempeñan funciones en el desarrollo de la colonia.

Estos insectos anidan en la tierra, a veces en zonas muy alejadas del edificio atacado. Solo dejan en la madera una ligera capa superficial que las protege de la luz, quedando el resto de la madera perforada por infinidad de galerías longitudinales. Necesitan ambientes húmedos y de temperatura media bastante constante. (Abasolo et al., 1998)

Las termitas que se encuentran en España se clasifican en subterráneas y termitas de madera seca:

1. Termitas subterráneas.

Su nido principal está en el suelo y casi siempre fuera de los edificios atacados. Entran subterráneamente a los edificios en el que forman un nido secundario. La tierra aporta lo que necesitan: oscuridad, temperatura moderada constante, y humedad permanente. Van a pequeños rincones húmedos de muros o paredes o a las cavernas ya producidas en la madera atacada (cabezas de vigas o detrás de zócalos). Para desarrollarse necesitan un cierto grado de humedad (>18%) y temperatura (óptimo en 30° C). Abren galerías paralelas a la dirección de las fibras, dejando una capa exterior intacta que les oculta del exterior, de espesor reducido (1 a 2 mm). En ciertos casos constituyen tubos o canales de pequeño diámetro (1 o 2 mm) y de pared gruesa, constituidos por una sustancia de secreción y tierra que se endurece al ponerse en contacto con el aire. Estos tubos sirven como vías de paso de una pieza de madera a otra. Normalmente necesitan varios años para provocar daños peligrosos para un edificio, pero existen casos en que en dos años han producido daños estructurales graves.

2. Termitas de madera seca.

Forma sus nidos en madera seca de las edificaciones. El desarrollo es muy lento. La reina sólo pone de 1 a 2 huevos por día y la colonia no suele ser muy numerosa, de 100 a 250 individuos. Necesitan un contenido de humedad del 15% (límite máximo para su ataque). Las perforaciones de entrada están tapadas por una secreción que forma una película fina, quedando el orificio casi invisible. El ataque lo realizan las ninfas procedentes de las larvas. Su capacidad de destrucción es muy elevada. Muebles en meses, y estructuras de cubierta en 1 o 2 años. (Arriaga et al., 2002).

▪ Otros insectos

Los sirícidos (avispa de la madera) son insectos parecidos a las avispas de color negro que atacan a los árboles de conífera enfermos o recién cortados. La madera de estos árboles puede incorporarse a los edificios y las larvas que se hayan introducido pueden emerger, sin embargo no pueden volver a infestar la madera seca. Las larvas realizan galerías de sección circular con diámetros de 4 a 7 mm de grandes longitudes (20 a 45 cm). La duración del ciclo biológico es de dos a tres años. Los orificios de salida son de forma circular de 4 a 7 mm de diámetro.

Los xilocópidos (abeja carpintera) no son propiamente xilófagos, pues la madera no constituye su principal alimento. Afectan a la madera sana o levemente degradada de coníferas y frondosas. El insecto adulto hembra perfora galerías de 10 a 15 mm de diámetro siguiendo la dirección de la fibra, su longitud puede llegar a alcanzar los 45 cm. Los orificios de salida son de forma circular y de 10 a 15 mm de diámetro. (Arriaga et al., 2002).

▪ Xilófagos marinos

Los daños más importantes que se producen en la madera que está en contacto con el agua marina vienen derivados de los moluscos y los crustáceos. Los moluscos realizan una degradación en el interior de la madera que no suele ser visible, en cambio los crustáceos producen una degradación superficial que es visible desde el exterior. (Arriaga et al., 2002).

Figura 2. Cuadro resumen agentes bióticos

Clases	Tipo	Galería	Orificio	Especie	Parte	Contenido Humedad	Daño
Hongos	Cromógena	No	No	Coníferas Frondosas	Albura + Duramen	18 - 20%	Mínima agresión
	Pudrición	No	No	Coníferas Frondosas	Albura + Duramen	18 - 20%	Pérdida de densidad y resistencia
Insectos	Carcoma	Sí	1,5-4 mm	Coníferas Frondosas	Albura	Cualquier contenido	Pérdida de densidad y resistencia
	Carcoma grande	Sí	6 -12 mm	Coníferas	Albura	10 - 14%	Pérdida de densidad y resistencia
	Polilla	Sí	1 - 2 mm	Frondosas	Albura	16%	Pérdida de densidad y resistencia
	gorgojo de la madera	Sí	1 - 2 mm	Coníferas Frondosas	Albura	≥ 20%	Pérdida de densidad y resistencia
	Bostríchidos	Sí	3 - 6 mm	Frondosas	Albura	Madera seca	Pérdida de densidad y resistencia
	Termita Subterránea	Sí	No	Coníferas Frondosas	Albura + Duramen	> 18%	Pérdida de densidad y resistencia
	Termita Madera seca	Sí	No	Coníferas Frondosas	Albura + Duramen	< 15%	Pérdida de densidad y resistencia
	Avispa de la madera	Sí	4 - 7 mm	Coníferas	Albura + Duramen	Cualquier contenido	Pérdida de densidad y resistencia
	Abeja carpintera	Sí	10 - 15 mm	Coníferas Frondosas	Albura + Duramen	Cualquier contenido	Pérdida de densidad y resistencia
	Xilófagos marinos					Cualquier contenido	Pérdida de densidad y resistencia

2.2.2. Patologías de origen abiótico

Dentro de este apartado hablaremos de factores de crecimiento, agentes atmosféricos, productos químicos y trataremos sobre el fuego en la madera.

- Factores de crecimiento

El origen de las tensiones de crecimiento parece estar en la búsqueda, por parte del árbol de una posición recta y estable. Para ello, las células de madera producidas por el cambium, tienden, en su proceso de maduración, a expandirse lateralmente y a contraerse longitudinalmente, pero la madera formada en años anteriores impide esta tendencia, con lo que se genera un estado de tensiones. Por ello, el crecimiento natural del árbol, provoca defectos en la madera, los cuales condicionan el uso de ésta como elemento estructural:

1. Fendas: son grietas o hendiduras longitudinales, producidas generalmente por desecación o por heladuras. Los principales efectos de las fendas son los debidos a la pérdida de resistencia, que se hace especialmente patente en los

esfuerzos de flexión y de tracción perpendicular a la fibra, consecuencia del trabajo independiente que realiza cada una de las partes de la madera separadas por la rotura que supone la fenda. (Vignote Peña et al., 2006)

2. Médula débil: En árboles de gran porte, en donde las tensiones de crecimiento son muy importantes, el centro del árbol sufre un deterioro, difícilmente observable a simple vista, pero que se pone de manifiesto por su escasa resistencia mecánica, fundamentalmente en el plano transversal. (Vignote Peña et al., 2006)
3. Acebolladura: Es el despegue producido entre anillos de crecimiento contiguos a lo largo del eje del árbol. Su origen se debe a esfuerzos mecánicos producidos por agentes externos como viento, hielo, insolación, etc. El árbol trabaja como una ménsula, y como las tensiones internas son distintas en los diferentes anillos, es posible que se resbalen dos capas contiguas originando este defecto. Las acebolladuras suponen pérdidas de resistencia mecánica en la madera. La probabilidad de aparición de acebolladura aumenta con la edad del árbol y dentro de estos los que tienen un diámetro menor. (García Esteban et al., 2003)
4. Curvatura del tronco: Los tallos crecen en sentido contrario a la fuerza de gravedad de forma vertical, pero en ocasiones, esta rectitud no es absoluta, pudiendo aparecer una o varias curvaturas más o menos acusadas, cuyo origen u orígenes puede obedecer a diferentes causas (viento dominante, nieve, pendiente, etc.). La falta de rectitud en los fustes es importante porque de ella se derivan problemas como es el caso de la fibra torcida. Se dice que un árbol tiene fibra torcida, cuando presenta esa característica y tiende a alabearse con cierta facilidad. (Vignote Peña et al., 2006)
5. Nudo: Es una inclusión de la que parte la rama dentro del tallo del árbol. La presencia de nudos disminuye de forma notable la resistencia de la madera, en las secciones donde aparecen. En este aspecto, cuanto mayor sea el nudo, mayor será la pérdida de resistencia. También influye la posición del nudo, siendo desfavorables los nudos situados en el centro de las piezas. Además este defecto dificulta en gran medida la trabajabilidad de la madera. (Vignote Peña et al., 2006)
6. Desviación de la fibra: En una madera de estructura normal, las fibras se orientan de forma general en dirección longitudinal paralela al eje del árbol, o bien, en dirección perpendicular al eje del árbol, según los radios. Esta disposición tiene excepciones, bien en la madera juvenil, que suele tener una disposición espiralada, o a partir de edades de madurez en donde muchas especies la fibra pasa de seguir el eje del árbol, a adquirir ciertos ángulos produciendo fibra ondulada o fibra entrelazada. Desde un punto de vista estructural, estos defectos no son deseados, ya que suponen una cierta pérdida de resistencia en dirección paralela a la fibra. Además su presencia provoca ciertas dificultades de mecanización. (Vignote Peña et al., 2013)

- Agentes atmosféricos

Destacan el sol y la lluvia. Una de las principales causas del deterioro superficial es como consecuencia de los cambios rápidos del contenido de humedad de la capa externa. La diferencia de humedad entre el interior y la capa superficial, provoca un estado de tensiones en la pieza que ocasiona curvaturas, alabeos y fendas.

La radiación solar actúa a través de los rayos ultravioleta e infrarrojos. La radiación ultravioleta degrada la madera superficialmente, oscureciéndola convirtiéndola al principio en un color marrón y tornándola después a un color grisáceo. Ésta radiación degrada los componentes de la madera comenzando por la lignina. La incidencia del agua de lluvia provoca por erosión la eliminación de los productos degradados.

El agua y el sol actúan de forma combinada y se potencian entre si multiplicando sus efectos.

Los rayos infrarrojos provocan una acción degradante indirecta, ya que mediante un proceso de calentamiento superficial generan la aparición de fendas en la cara expuesta y la subida de resinas a la superficie.

- Productos químicos

Su acción produce simples alteraciones de color en la madera, ya que ésta es muy resistente a los agentes químicos. Los ácidos fuertes, lejías alcalinas y detergentes son los que consiguen producir mayores alteraciones.

La madera de frondosas puede sufrir daños de origen químico en ambientes ácido o alcali. Los ácidos rompen las cadenas de carbono de la composición de la madera (hidrólisis³) dejando la parte afectada con un aspecto fibroso. En este aspecto las frondosas son más susceptibles de deterioro que las coníferas, aunque en zonas de alta contaminación se han podido encontrar daños de este tipo en piezas de madera conífera.

El ambiente alcalino produce un daño más grave. Si los ácidos afectaban a la celulosa con poca influencia sobre la lignina, los álcalis actúan al revés. Éstos degradan la lignina y las hemicelulosas de forma que la madera pierde resistencia y consistencia. En la madera para la construcción este proceso apenas tiene relevancia.

La mayoría de las maderas son ácidas, las utilizadas en la construcción como pueden ser el pino silvestre y el roble, tienen valores del pH de 5 y 4 respectivamente. La acidez no presenta ningún problema salvo que la madera esté húmeda; algunas maderas exudan ácido acético que provoca la corrosión de los metales si no están adecuadamente protegidos. Con el tiempo ciertas maderas pierden los ácidos y se reduce su capacidad de corrosión.

- Fuego

La composición principal de la madera (celulosa y lignina), formada a su vez de carbono, hidrógeno y oxígeno la hacen combustible.

La madera maciza no arde rápidamente y en caso de incendio son pocos los sucesos en los que el primer material en fallar estructuralmente haya sido la madera.

Sin la presencia de llama, la madera para arder necesita una temperatura en superficie superior a 400 °C y con presencia de llama la temperatura que necesita es de 300 °C durante un cierto tiempo antes de que se produzca la ignición.

Durante un incendio la madera ofrece un comportamiento de características muy favorables para la estructura, pues en un inicio se produce una combustión rápida de la superficie de la madera originándose una capa carbonizada. Debajo de esta capa existe

³ *Hidrólisis*: conversión de los polímeros de carbohidratos que contiene la madera en monosacáridos mediante reacción química con agua en presencia de catalizadores ácidos.

otra donde se produce la pirólisis⁴ y finalmente, bajo ésta, aparece la madera sin afectar por el fuego.

La madera es un material con gran capacidad de aislamiento térmico y la capa carbonizada es 6 veces más aislante que la propia madera, de esta forma el interior de la pieza se mantiene frío y sus propiedades físicas y mecánicas inalteradas. Por tanto la pérdida de capacidad portante de la estructura se debe a una simple reducción de sección, más que a una pérdida de resistencia del material.

La combustibilidad de la madera depende de la relación entre la superficie y el volumen de la pieza, de tal forma que cuanto mayor es esta relación más fácil es la ignición y más rápida la propagación de la llama.

Las fendas también incrementan los efectos del fuego, este es el motivo por el cual la madera laminada que apenas tiene fendas se emplea una velocidad de carbonización menor que en la madera maciza.

Por otro lado, cuanto más elevada sea la densidad de la madera menor será la facilidad para comenzar arder y más lenta será la combustión.

En relación al fuego en la madera hay dos cosas importantes a tener en cuenta, una es la velocidad de carbonización y otra es el comportamiento de las uniones.

La velocidad de carbonización es la relación lineal entre la profundidad carbonizada y el tiempo transcurrido. Esta relación nos permite determinar cuál es la sección residual después de un tiempo determinado.

Para madera maciza de coníferas esta velocidad es de 0,80 mm/min y para madera maciza de frondosas es de 0,50 a 0,70 mm/min. Por otra parte, en la madera laminada de coníferas la velocidad es de 0,70 mm/min y en las frondosas es de 0,50 a 0,70 mm/min. (Datos extraídos de tabla E.1. velocidad de carbonización nominal de cálculo, β_n , de maderas sin protección en el CTE).

Las uniones en las estructuras de madera son lo que podemos denominar como “el punto débil” en caso de incendio. Las mayores profundidades de carbonización se darán en los ensambles de las piezas, ya sea por uso de elementos metálicos como por existencia de juntas que faciliten la penetración del fuego. (Arriaga et al, 2002).

2.2.3. Patologías de origen estructural

El deterioro que puede sufrir una estructura debido a causas relacionadas con la estabilidad y resistencia puede deberse a un mal diseño o una mala ejecución:

- Sección insuficiente para cargas que actúan o como consecuencia a un aumento de las cargas con respecto al origen de la estructura.
- Deformaciones elevadas debido a efectos de la fluencia en piezas colocadas en verde y roturas a largo plazo.
- Fallos en uniones por dimensionado insuficiente o un diseño incorrecto.
- Roturas en algunas piezas con defectos locales.
- Arriostramiento insuficiente que conduce a desplome y pérdida de verticalidad.
- No disponer de durmientes en muros para nivelación y reparto correcto de cargas de las piezas.

⁴ *Pirólisis*: es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (y de cualquier halógeno). Involucra cambios simultáneos de composición química y estado físico, los cuales son irreversibles.

- Empotrar cabezales en muros, sobre todo en ambientes húmedos.
- No arriostrar entre si viguetas muy esbeltas para evitar su vuelco.
- Insuficiencia de entrega de vigas y envigados en muros o de viguerías sobre vigas maestras.

Figura 3. Agentes de alteración de la madera.

Agente	Daño producido
<i>Abióticos</i>	
Factores de crecimiento	Fibra torcida; Médula débil o blanda; Curvatura del tronco; Desviación de fibras; Nudos; Fendas; Acebolladuras.
Agentes climáticos	Decoloraciones; Fendas; Merma de facultades mecánicas; Envejecimiento.
Agentes químicos	Simples alteraciones de color en la madera; En ambiente alcalino la lignina se daña y la madera pierde resistencia y consistencia.
Fuego	Carbonización; Pérdida de resistencia, pudiendo llegar a la destrucción.
Uso mecánico	Fatiga y pérdida de resistencia. Deformación y desgaste por rozamiento. Inestabilidad.
<i>Bióticos</i>	
Insectos xilófagos	Perforaciones y pérdida de masa. Disminución de resistencia, pudiendo llegar a la destrucción total
Xilófagos marinos	Similar al de los insectos
Hongos cromógenos	Cambios de color y ligera pérdida de resistencia. Ligero debilitamiento y predisposición de la madera frente a otros ataques.
Hongos de pudrición	Descomposición de la madera, con importante pérdida de peso y de resistencia. Variación de características organolépticas ⁵ .

⁵ *Características organolépticas*: se refieren al conjunto de estímulos que se perciben a través de los órganos de los sentidos. Tras llegar la información al cerebro mediante un proceso nervioso, se producen las diferentes sensaciones: color, forma, tamaño, aroma, textura y sabor.

3. Evaluación de daños

La evaluación de daños es un proceso destinado a describir de manera objetiva el posible impacto que se ha producido sobre una estructura. Otra forma de definirlo podría ser "Identificación y registro cualitativo y cuantitativo de la extensión, gravedad y localización de los efectos de un hecho adverso." (Álvarez Leiva et al. , 2007)

Esta valoración de las circunstancias que muestra las consecuencias de los posibles desperfectos encontrados, sirve para definir las acciones prioritarias y hacer el análisis de las necesidades más urgentes. Los objetivos de la evaluación son, en líneas generales, estudiar los efectos directos y los colaterales que se producen.

La madera, en su condición de material perecedero, al ser colocada en servicio puede sufrir los daños de diversos agentes de deterioro, como hemos visto en el apartado anterior. Ante esto se realizan una serie de pasos para llegar a la elección del tratamiento más idóneo según el caso.

A continuación se describen las técnicas más habituales de inspección y los posibles tratamientos que se aplican a una estructura de madera en proceso de deterioro.

3.1. Técnicas de inspección

En general el procedimiento de inspección se desarrolla con una visita inicial en la que se realiza un reconocimiento visual, y en esta inspección previa se marcarán los puntos donde deben realizarse catas. En la segunda fase se realizan las inspecciones de las catas abiertas anotando las patologías encontradas y sus características.

En la inspección de los forjados, o de cualquier otra parte del edificio, es conveniente dirigirse a las zonas de mayor riesgo de ataque en la estructura de madera.

La madera comienza a degradarse por la parte más débil, ésta se corresponde con la albura de la madera que se encuentra en la zona externa de la sección de la pieza. La degradación en el duramen es mucho más difícil, de ahí que la degradación de la sección sea de fuera hacia dentro.

Además la superficie de mayor riesgo en una pieza de madera es la testa, ya que presenta una gran porosidad y capacidad de absorción de agua, y es en estos lugares que están ligados con fuentes de humedad los que permiten el desarrollo de los hongos y facilitan la acción de algunos insectos xilófagos con mayor facilidad.

Si las zonas más favorables a la degradación se encuentran en buen estado es muy probable que el resto de la estructura se encuentre sana.

3.1.1 Técnicas visuales

Las técnicas empleadas para la estimación de los daños producidos por agentes xilófagos son sencillas y requieren un equipo mínimo.

Entre los instrumentos empleados en las inspecciones destacaremos los siguientes, su utilización dependerá de cada situación y del grado de detalle que se pretende obtener:

Medidores de humedad: puesto que la humedad es uno de los factores que propicia el desarrollo de algunos agentes xilófagos, éstos nos permiten determinar el contenido de humedad de una forma rápida.

Lupa y espejos: son herramientas que ayudan a ver con mayor detalle los lugares donde el ojo humano no alcanza.

Martillo: el sonido producido al golpear el elemento estructural nos permite estimar si se encuentra o no bajo carga; sonido gordo (blando, grave, sin rebote) la pieza no está bajo carga, posibilidad de que esté dañada, sonido claro y tenso la pieza se encuentra en tensión. Si al golpear se produjera un sonido hueco esto indica que la madera está dañada.

Taladro: esta máquina nos permite conocer la profundidad y extensión del ataque sin necesidad de eliminar toda la parte destruida. La utilidad mayor de este instrumento está en la detección del estado de conservación de la madera de las zonas ocultas, como pueden ser las cabezas de las vigas embebidas en el muro.

Azueta: se emplea para eliminar zonas de madera degradadas, con el fin principal de preparar la realización de los tratamientos curativos, también sirve para medir el alcance del ataque. (Arriaga et al., 2002).

3.1.2 Técnicas instrumentales

En la mayoría de las técnicas utilizadas en la exploración de las piezas estructurales de madera se estiman las propiedades mecánicas mediante la medición de la velocidad de propagación de los ultrasonidos o de ondas de esfuerzo causadas por impactos que hacen vibrar la pieza. Otras determinan la densidad de la madera, como son el resistógrafo, el pilodyn y la densitometría mediante rayos gamma. (Arriaga et al., 2002).

- Ultrasonidos

La inspección por ultrasonido es un método no destructivo en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en la superficie y en el interior. Se considera ultrasonido aquellas oscilaciones de presión que poseen frecuencias por encima de la gama perceptible (esto es, superior a 20 000 Hz).

El objetivo de este método es determinar el módulo de elasticidad dinámico deducido a partir de la velocidad de propagación de las ondas y de la densidad del material. Y partiendo de estos datos se deduce el módulo de elasticidad estático y se estima la resistencia.

Los ultrasonidos pueden aplicarse según diversos métodos, pero para el estudio de la madera probablemente el más adecuados sea el método de transmisión. Éste método: Utiliza dos palpadores, un emisor y un receptor. La frecuencia debe ser lo suficientemente baja para conseguir un alcance mayor de los impulsos y poder sortear las irregularidades del material. En este sistema una discontinuidad en el material, como una grieta o nudo, tienen por efecto un aumento del tiempo transcurrido hasta llegar al receptor, lo que significa que el camino de las ondas es mayor al tener que sortear el obstáculo. La principal desventaja del método es que la profundidad de la falla no puede ser medida. (Arriaga et al, 2002).

- Método de vibraciones inducidas

Se basa en los mismos principios que la técnica de ultrasonidos. La forma de trabajo consiste en introducir en la madera una onda de esfuerzo mecánico mediante un golpe con martillo o similar; esta onda se propaga y se detecta en dos puntos a lo largo de su

camino; cuando la onda alcanza el primer acelerómetro se pone en funcionamiento un contador de tiempo; y cuando la onda llega al segundo acelerómetro el contador se detiene reflejándose en el visor el tiempo transcurrido en microsegundos.

Este instrumento detecta pudriciones o defectos internos mediante la pérdida de velocidad de transmisión comparada con la madera sana. (Arriaga et al., 2002).

- Resistógrafo

El resistógrafo consiste en un taladro mecánico que realiza una perforación de 3 mm de diámetro en la dirección radial de la sección de la pieza y que evalúa la resistencia que ofrece a la perforación, ésta se mide mediante el consumo de potencia. La resistencia que ofrece a su avance se relaciona con la densidad de la madera y es capaz de detectar los anillos de crecimiento al encontrar diferencias de densidad entre la madera de verano y de primavera. También localiza pérdidas de densidad debida a pudriciones u oquedades. (Arriaga et al., 2002)

- Resistencia al arranque/extracción de tornillo.

Es un método casi no destructivo, pues su afección a la pieza es mínima, que consiste en introducir un tornillo en la pieza que se desea estudiar para posteriormente arrancarlo con el extractor. Durante dicha operación se mide la resistencia al arranque que presenta la pieza, que coincide con la máxima fuerza aplicada para lograrlo. Permite establecer una relación de densidad. Al igual que los ultrasonidos se trata de un método portátil y de fácil implantación en obra.

Los parámetros que influyen en la resistencia al arranque de tornillos son muy variados, por lo que antes de realizar las mediciones hay que decidir una serie de aspectos previos como pueden ser: diámetro del tornillo a utilizar, longitud de tornillo que debe introducirse, definición de las zonas donde se deben realizar las mediciones, número de extracciones que deben hacerse por muestra, etc. (Casado et al., 2005).

- Medición de la densidad superficial

La estimación de la densidad en la superficie de la madera se realiza mediante el dispositivo "pilodyn". Consiste en un cilindro metálico en cuyo interior se aloja un muelle que se comprime mediante un mecanismo de accionamiento manual que acumula una energía de 6 julios. Se coloca sobre la superficie de la madera y al soltar el muelle se dispara una barra circular de 2,5 mm de diámetro que se clava sobre la superficie. Se mide la penetración en la madera en una escala graduada que llega a un máximo de 40 mm y este valor se relaciona con la densidad de la madera. Este instrumento está limitado a evaluar el estado de la superficie de una pieza. (Arriaga et al., 2002).

- Gamma-densitometría

Es un método que mide la densidad de un material emitiendo una radiación a través de la pieza de la que se conoce el coeficiente de absorción y se mide la energía recibida al otro lado. (Arriaga et al., 2002).

4. Tratamientos curativos.

Los tratamientos curativos están pensados para mejorar su estado y tienen como objetivo prioritario el detener la acción de los agentes degradantes y dejar la madera protegida ante posibles ataques posteriores. Estos tratamientos no solo se centran en el elemento o elementos afectados sino que también se aplican a su entorno, constituyéndose como proceso preventivo.

Con la aplicación de los distintos tipos de tratamientos se pretende, en lo posible, devolver la apariencia externa y las propiedades resistentes a la madera. Así durante la ejecución del proceso es necesario en ocasiones descubrir la madera, y limpiarla hasta dejarla con el poro abierto, para lo que se requieren importantes medios mecánicos y/o químicos. En otros casos bastaría con aplicar elementos de cubrición a fin de mantener su apariencia original, una vez impregnada la madera con protectores.

Se establece en cuanto a la determinación de las medidas a aplicar en la madera y su entorno, dos grandes grupos:

Por un lado se presentan las medidas constructivas, cuyo objetivo es mejorar las condiciones de la madera, mediante la variación de aquellas que favorecen la presencia y/o desarrollo de los agentes de deterioro. Entre ellas, se incluye, por ejemplo: la eliminación de la humedad a través del arreglo de conducciones defectuosas de agua o de cubiertas, drenajes del terreno o el incremento de voladizos protectores de la parte superior de las fachadas. Asimismo, las buenas prácticas constructivas como dejar ventilación en encuentros muro-viga/vigueta o la realización de una buena impermeabilización.

Y por el otro están las medidas estructurales, que tras un posible deterioro que se expande por la estructura se produce una falta de seguridad y estabilidad en la misma, que deben ser eliminadas. Así pues, entre las medidas más importantes se encuentran: la sustitución, el refuerzo, la consolidación y la protección química.

- Medidas de sustitución: para maderas muy dañadas a las que no conviene ni consolidar ni reforzar. Se elimina la madera afectada y se coloca otra de igual especie o compatible impregnada con protectores, o se opta por un elemento de otro material.
- Medidas de refuerzo: consisten en el aumento de la capacidad resistente de un elemento estructural, sin actuar directamente sobre la madera, a fin de limitar su deformación. Un ejemplo de ello son los apeos o los parteluces.
- Medidas de consolidación: para aquellas maderas que presentan zonas deterioradas muy delimitadas y cuya magnitud no implica la sustitución total del elemento. Su principal objetivo es la recuperación de la capacidad resistente inicial, para lo cual se emplean diversas técnicas de consolidación, como son: hormigón-madera; elementos metálicos; elementos de madera: se sanear las partes dañadas y se utilizan prótesis de madera en íntima unión; productos epoxi...
- Medidas de protección química: se emplean para todos los casos de tratamientos curativos de la madera y conllevan las siguientes fases de actuación general:

1. Estudio del grado de afección de la madera.

2. Diagnóstico de los agentes de deterioro de la madera y de las condiciones favorecedoras del entorno.
3. Aplicación de los protectores químicos adecuados mediante sistemas idóneos que permitan controlar la propagación de los agentes dañinos, y en los casos que se precise imponer medidas químicas complementarias que erradiquen los agentes deteriorantes en el entorno.

Los tratamientos curativos basados en medidas de índole química requieren de una correcta elección del método a emplear, puesto que de ello depende la eficacia del producto frente a los agentes bióticos:

Métodos de tratamiento

1. Tratamientos de inyección

Se realizan mediante el empleo de un equipo que inyecta a presión el producto protector a través de boquillas unidireccionales (sin retorno). Este tipo de tratamiento se realiza generalmente con protectores de tipo orgánico. Son especialmente útiles en tratamientos contra los hongos y las termitas.

2. Tratamientos con gases

Son especialmente indicados para tratamientos contra xilófagos de ciclo larvario. Generalmente para elementos de tamaño reducido o que se puedan aislar. Se emplean cámaras herméticas para poder exponer las piezas a los gases. Existen dos posibilidades, la primera es el uso de gases tóxicos, como el bromuro de metilo, ácido cianhídrico, fosfuro de hidrógeno, óxido de etileno o gas carbónico, que eliminan los insectos por envenenamiento. La segunda, es el uso de gases inertes, como el nitrógeno, argón o dióxido de carbono, que crean una atmósfera sin apenas oxígeno que causa la muerte de los insectos por asfixia. En España, estos tratamientos han de ser efectuados por empresas especializadas y requieren una autorización especial de Protección Civil. Todos estos sistemas, tienen la ventaja de su efectividad, erradicando cualquier tipo de ataque sobre las piezas de madera, y su inocuidad con los acabados superficiales. Entre los inconvenientes se encuentran el elevado grado de toxicidad de los gases utilizados y que requieren personal y equipos especiales.

3. Tratamientos con humos y nebulizaciones

En algunas situaciones en las que el acceso a los elementos de madera es muy complicado, se pueden aplicar sistemas que, mediante el uso de botes de humo, producen una nube de partículas (micropulverización) que se va depositando en la superficie de la pieza formando una fina película del producto insecticida que elimina a los insectos que entran en contacto con ella. Al ser un tratamiento superficial tiene el inconveniente de no afectar a los insectos situados en el interior de las piezas, por lo que se debe repetir cada año hasta completar el ciclo de vida del insecto, prolongando el proceso varios años.

4. Tratamientos por esterilización con temperatura

Este tratamiento se basa en que las larvas de los insectos mueren a temperaturas superiores a los 55 o 60°C si se mantienen durante 30 - 60 minutos. Se utiliza para la esterilización de partidas de madera en cámaras de secado, por lo que su utilización en obra no es posible.

Otra posibilidad es el uso del frío o de bajas temperaturas, que se denomina tratamiento de choque térmico. Su metodología es más compleja, ya que requiere cámaras frigoríficas o sistemas basados en nitrógeno líquido. Se aplica a piezas que pueden ser trasladables con facilidad. Ambos procedimientos no son frecuentes en España. (AITIM, 2015)

5. Tratamientos con cebos

Este sistema depende del conocimiento de los recorridos de los agentes bióticos, es la disposición de cebos de celulosa impregnada con un producto químico que inhibe la formación de la quitina, y produce una eliminación lenta y selectiva de los insectos. Este sistema tiene ventajas medioambientales, al no precisar la impregnación de la madera ni otras partes de la obra, pero no asegura la protección para un posible ataque futuro, por lo que ha de mantenerse la madera seca.

Metodología del tratamiento

1. Metodología del tratamiento contra hongos xilófagos

Los hongos de pudrición de la madera únicamente se desarrollan cuando el contenido de humedad de la misma alcanza un valor superior al 20%, por este motivo, la simple eliminación de las fuentes de humedad detiene su ataque. Es decir, las medidas de carácter constructivo son suficientes para resolver el problema.

Las medidas de eliminación de las humedades son críticas, ya que si se vuelven a alcanzar los niveles de humedad adecuados el ataque de los hongos se reactivará. En el tratamiento de la madera se emplean productos químicos de tipo orgánico aplicados por inyección y por pulverización; y en el de los muros productos hidrodispersables. El tratamiento incorpora las siguientes fases: preparación de las superficies y tratamiento de las piezas de madera (eliminación de las zonas dañadas y la aplicación del producto protector).

2. Metodología del tratamiento contra los insectos de ciclo larvario

Antes de realizar el tratamiento curativo se deberán haber delimitado las zonas afectadas, procurando diferenciar entre ataque activo y ataque no activo, ya que en las zonas no activas es suficiente un tratamiento preventivo.

La secuencia de operaciones a realizar es la siguiente: acceso y limpieza de la zona; tratamiento curativo en profundidad (inyectar el producto hasta el interior de la madera) o de forma superficial (pulverizar las piezas con el producto).

En el tratamiento de la madera para la eliminación de este tipo de insecto se emplean normalmente productos químicos de tipo orgánico aplicados mediante pulverización e inyección.

El tratamiento de piezas de madera policromada requiere un estudio previo de la compatibilidad del producto químico del tratamiento (principalmente del disolvente) y el tipo de pintura o policromía, así como de las posibles capas de imprimación. También es importante conocer la composición de los pigmentos que componen la policromía antes de su aplicación.

Otra posibilidad, si se trata de elementos delicados, o si los tratamientos con productos químicos por inyección son inviables, es el tratamiento con gases (fumigación).

3. Metodología del tratamiento contra insectos xilófagos sociales

Se trata de un tratamiento bastante complejo, puesto que para conseguir una completa protección, hay que conseguir la huida de las termitas tanto en los elementos de madera que se encuentren en el interior de la edificación, como erradicar su presencia en los alrededores (muros y suelos). El orden de pasos a seguir es: suprimir las fuentes de humedad y evitar el contacto y la cercanía de la madera con el suelo, se eliminará la madera atacada. El tratamiento químico, consiste en:

1. Pulverización e inyección de productos químicos, por perforaciones de 6 a 8 mm, cada 30 cm, en el $\frac{1}{4}$ superior de la altura.
2. Barreras químicas en los muros, sobre los que se apoyan las piezas de madera, con perforaciones de 20 mm, intentando impedir el acceso de las termitas a las vigas.
3. Barreras químicas en el suelo, rodeando en forma de anillo a 20 cm, los arranques de los muros, con perforaciones de 20 mm, evitando su acceso desde el terreno.

La utilización de cebos para la erradicación de termitas es otra posibilidad que en la actualidad se está aplicando con éxito en numerosos países. (AITIM, 2015)

Figura 4. Tabla resumen de los posibles tratamientos curativos dependiendo del agente destructor. (AITIM, 2015)

Método de tratamiento	Agente Xilófago		
	Hongo	Xilófagos ciclo larvario	Xilófagos sociales
Productos líquidos			
Inyección-Pulverización	+++	+++	+++
Gases		++	
Humos-Nebulizaciones		++	
Temperatura		++	
Cebos			++

+++ = tratamiento principal

++ = tratamiento poco frecuente

5. Sistemas de consolidación y/o refuerzo de forjados de madera.

Después de la breve exposición sobre las causas del deterioro en la madera, en este apartado nos dedicaremos a estudiar los diferentes sistemas de consolidación y/o refuerzo que podemos encontrar, para posteriormente poder establecer una comparativa razonada de los mismos.

Una vez localizados y evaluados los daños, causados por cualesquier tipo de agente biótico o abiótico, se procederá a analizar cada elemento dañado, para ver cómo afecta a su resistencia el deterioro sufrido en la estructura. Puede darse el caso de que la pérdida de material no afecte a su resistencia: esto es frecuente en el caso de las cabezas de vigas de ciertas luces, dado que la sección necesaria para resistir el momento flector en el centro del vano puede llegar a ser doble o incluso triple que la necesaria para absorber el esfuerzo cortante en el apoyo. En el caso de que la pérdida de sección sufrida invalide al elemento dañado para cumplir la función estructural que tiene asignada en el conjunto, en principio caben dos soluciones bien diferentes: la sustitución, total o parcial de la pieza, o la consolidación/refuerzo.

Las consolidaciones o refuerzos buscan el aprovechamiento de la capacidad mecánica residual que posee la madera estructural. Así se elaboran sistemas de reparación donde, con un aporte de elementos que sumados a los ya existentes, trabajan de manera conjunta en la absorción de esfuerzos.

Por otro lado cuando los elementos a reforzar están tan dañados que con adosar una pieza que ayude en la absorción de cargas no es suficiente, la solución más adecuada se basa en sustituir la zona afectada. La eliminación puede ser total, cuando el alcance del daño afecta a toda la pieza, o parcial si los daños no afectan de manera global y la solución permite sustituir únicamente la zona dañada por una pieza de madera nueva, esto recibe el nombre de prótesis.

Decidir cuál es la óptima intervención no es fácil, dicha decisión puede depender de multitud de factores: coste de cada opción, dificultad de intervención, interés concreto en la conservación de la pieza, imposibilidad material de acceder con una pieza equivalente al lugar dañado, etc. (Nuere, 2007). También influyen como es lógico, las posibles causas que suelen motivar la necesidad del refuerzo:

1. El incremento de los valores de las cargas a las que puede estar sometida la estructura, debido a un cambio de uso o bien al incremento de sobrecargas de uso con el paso del tiempo. También se producen sobrecargas debido al fallo en una de las viguetas o en una viga, que cede y deja de soportar su carga correspondiente, aumentando la carga en los elementos adyacentes.
2. La disminución de la resistencia de la estructura, por degradación del material estructural o bien por la pérdida de sección de alguno de sus elementos.
3. El efecto de acciones accidentales, como puede ser el fuego entre otros.

En cuanto a la forma de intervenir, uno de los condicionantes que suele influir es el hecho de que la madera sea vista o permanezca oculta. Es evidente que la reparación de elementos ocultos es mucho más permisiva a la hora de escoger la forma de intervención, dado que las cuestiones de estética pasan a ser secundarias.

La elección del tipo de material con el que se va a realizar el refuerzo es otro de los factores a tener en cuenta. Ya que según la elección se obtendrán una serie de ventajas e inconvenientes. Por ejemplo, la utilización de perfiles y pletinas para la reparación de roturas de vigas es uno de los recursos más inmediatos que aparecen en la consolidación de obras antiguas. Se plantea un trabajo conjunto entre acero y madera. Y la aparición de las resinas epoxi hace aproximadamente 65 años, introdujo una nueva fórmula para la restauración en estructuras de madera. Aportando la gran ventaja de rellenar las cavidades sin presentar problemas de retracción ni de adherencia con prácticamente ningún material.

En resumen, las intervenciones en los forjados de vigas y viguetas de madera deben realizarse tras su previa diagnosis de las posibles causas de su alteración: ataque de los agentes bióticos y abióticos, fluencia de la propia madera o deficiencias en el dimensionado del forjado en relación con las solicitaciones mecánicas que recibe. La elección de la intervención implica el conocimiento de las condiciones de uso futuras, además de tener en cuenta la necesidad de conservación o no de los elementos sobre los que se actúa.

Según todo lo expuesto, se procede a numerar posibles sistemas de actuación que se pueden llevar a cabo sobre forjados de madera.

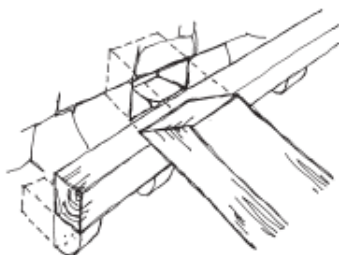
5.1 Adición de elementos estructurales

5.2.1 Refuerzo mediante colocación de apeo.

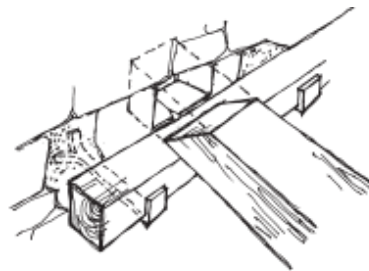
La pérdida de estanqueidad en un tejado o la humedad persistente en los alrededores de un forjado, puede conducir a que se pudran los elementos de carga que lo componen. Esto a largo plazo supone un riesgo de hundimiento generalizado. Por ello, la colocación de estructuras o elementos de apeo supone una posible solución al problema de pudrición en las cabezas de vigas o viguetas empotradas en los muros.

El sistema se basa en la disposición de una nueva línea de apoyo adosada al muro mediante una carrera, la cual puede ser de distintos materiales: madera, metálica o de hormigón.

Si la viga carrera es de madera, ésta descansará en ménsulas de piedra (il.41) o elementos metálicos especiales que se empotran en el muro (il.42), o también se puede apoyar sobre pies derechos adosados al muro. Su inconveniente radica en que las cargas que se transmiten al muro quedan descentradas respecto a su eje, lo que provoca una flexión en el muro favoreciendo su tendencia al desplome.

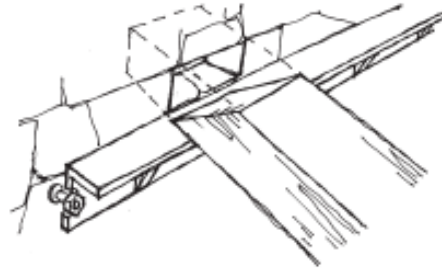


*Ilustración 41. Apeo cabeza de viga con viga carrera apoyada sobre ménsulas de piedra.
Fuente: (Díaz Gómez)*



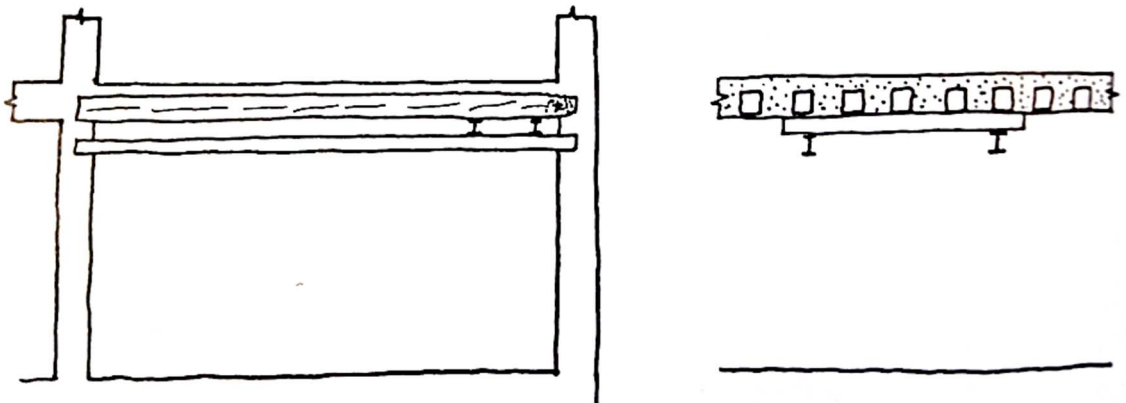
*Ilustración 42. Apeo cabeza de viga con viga carrera apoyada sobre elementos metálicos.
Fuente: (Díaz Gómez)*

Si la viga carrera es metálica (il.43), su colocación sería directa sobre el muro mediante anclaje, estas vigas suelen realizarse con perfiles en "L", pero la elección de la sección del perfil se realiza en función de las cargas a soportar y el impacto estético a lograr.



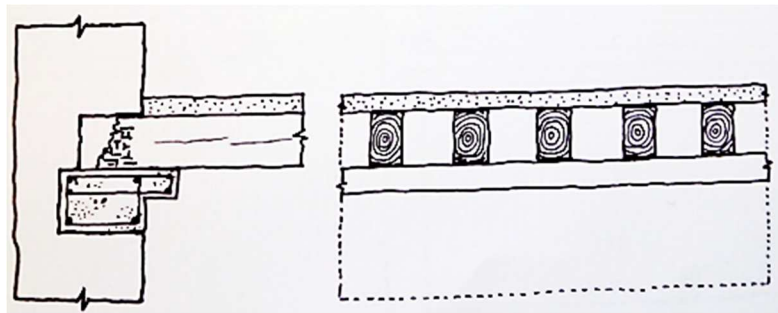
*Ilustración 43. Apeo sobre viga carrera realizada con perfil metálico.
Fuente: (Díaz Gómez)*

Dentro del uso de los perfiles metálicos hay otra opción más compleja y que afectaría a la altura libre y al impacto visual. Esta consiste en la disposición de una estructura de apeo a modo de emparrillado y que consta de una o dos carreras (il.44), dependiendo de la extensión de la pudrición, en posición paralela al muro de apoyo, que descansan sobre otras vigas paralelas a la dirección del forjado que apoyan sobre los muros de carga. (Arriaga et al., 2002).



*Ilustración 44. Vigas metálicas para soporte del forjado de madera en un tramo.
Fuente: (Arriaga et al, 2002).*

También se encuentra un método de apeo utilizando el hormigón. Sobre una viga con ménsula hormigonada en el muro descansan las cabezas de las vigas deterioradas (il.45).



*Ilustración 45. Viga carrera de hormigón para soporte de cabezas de viga del forjado de madera.
Fuente: (Arriaga et al, 2002)*

La disposición de una línea de apoyo adosada al muro, en ocasiones, puede suponer un problema de estabilidad en el muro. Ya que las posibles fijaciones en las que necesita apoyarse la viga, podrían llegar a debilitar al muro en la zona de anclaje. Para ello, se plantea la siguiente solución: se sustituyen los anclajes puntuales a lo largo del muro, por el empotramiento en cabeza de la viga de borde en el muro.

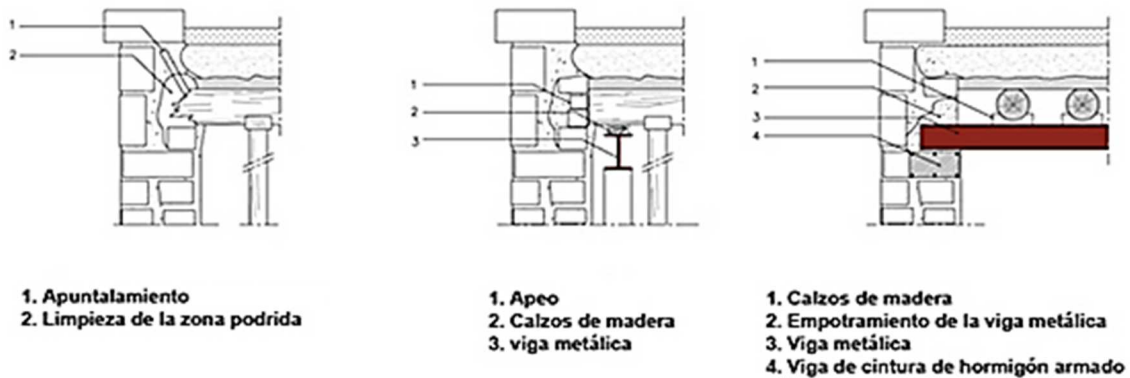


Ilustración 46. Reparación forjado mediante viga de borde empotrada en el muro.

Fuente: <http://goo.gl/skplyT> (10/05/2015; 10:39)

La operación puede ser realizada tanto con vigas de madera como con perfiles metálicos. Pero la elección del material sugiere una serie de ventajas e inconvenientes. El uso de una viga de acero garantiza, gracias al elevado módulo del material, una rigidez y unas medidas reducidas. Mientras que la viga de madera, en comparación con la de acero, necesita de secciones con mayores dimensiones para solventar el problema. A cambio, proporciona un menor impacto visual en el conjunto del refuerzo, en el caso de que éste tuviera que quedar a la vista.



Ilustración 47. Forjado con viga de borde de acero.

Fuente: <http://goo.gl/5NKkO1> (10/05/2015; 10:49)

5.2.2 Parteluces

Los parteluces pueden considerarse una de las soluciones más sencillas y eficaces para reducir las tensiones de flexión introducidas por sobrecargas o las deformaciones derivadas de la fluencia de la madera. Son constituidos por vigas de madera o bien mediante perfiles de acero, dispuestos transversalmente a la pieza que requiere refuerzo, obteniendo una división por la mitad o a los tercios de su luz.

El aspecto que viene restringiendo esta práctica es la obtención de unas buenas condiciones en el apoyo de dicho parteluz. Es necesario la presencia de muros transversales a los de carga de características resistentes suficientes y, en su ausencia, la formación de pilares específicos, con su consecuente cimentación, para la correcta transmisión de las cargas del parteluz al terreno.

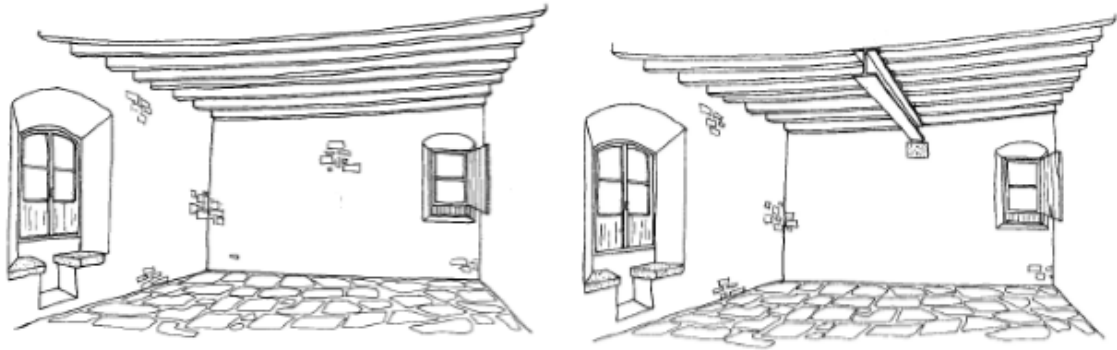


Ilustración 48. Solución mediante parte luces. Fuente: (Valeri)

Dentro de este apartado, hay que contemplar también una solución tradicional para disminuir el vano de una viga como son la introducción de jabalones que aportan puntos de apoyo intermedios. El encuentro entre viga-jabalcón se realiza mediante ensamble o bien a través de una pieza que ayuda a equilibrar los empujes de los jabalones. Este sistema ofrece un inconveniente ya que los muros deben resistir un empuje horizontal de difícil análisis.

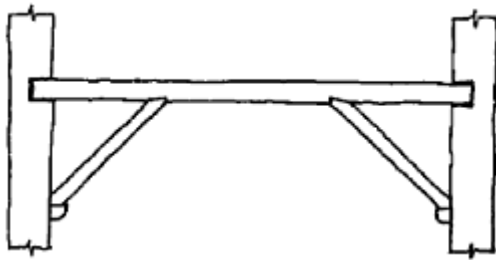


Ilustración 49. Disposición de jabalones mediante ensamble en viga.
Fuente: (Arriaga et al, 2002)

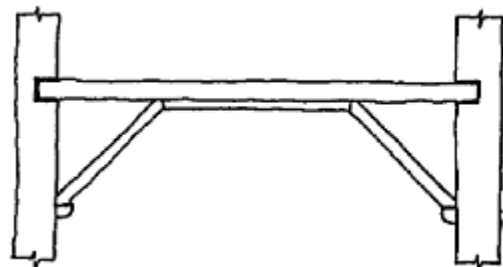


Ilustración 50. Disposición de jabalones mediante pieza equilibrante de empujes.
Fuente: (Arriaga et al, 2002)

5.2 Refuerzo y/o prótesis

5.2.3 Soluciones mediante aporte de madera

- Adición de piezas nuevas a las ya existentes, para combatir la posible pérdida de resistencia.

Cuando en los forjados se pierde capacidad resistente por causas como puede ser el aumento de la sobrecarga de uso, una de las soluciones más sencillas para solventar dicho problema, es la adición de nuevas piezas adosadas (il.51) o intercaladas a las originales (il.54). La ejecución es fácil siempre y cuando la operación de colocación de las nuevas piezas no requiera abrir ningún cajeado en el muro.

La descripción del método consiste en la realización de un previo estudio del diagrama de momentos de la viga dañada. Seguidamente se procede al dimensionado de las secciones de madera que deben añadirse, de forma que el momento de inercia y el módulo resistente resultante sean suficientes. Así se consigue devolver a la estructura su capacidad resistente inicial mediante un aumento de la sección resistente de una viga con tabloncillos adosados. Por último se encolan los tabloncillos y se fijan con tornillos para asegurar la unión.

El refuerzo del forjado que aquí se describe, tanto sirve para vigas como para las viguetas del mismo. Y la localización del refuerzo va a depender de las condiciones de ejecución o de los requisitos que hayan sido especificados en proyecto en cuanto a la conservación de la estructura.

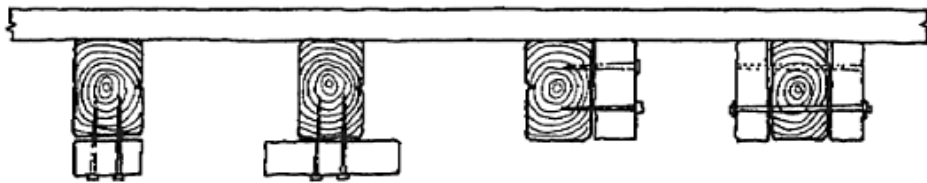
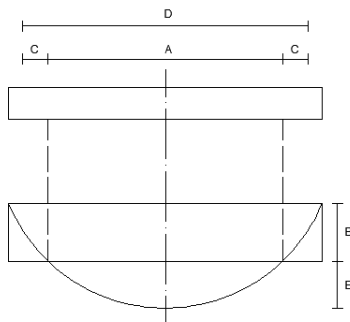


Ilustración 51. Refuerzo de viguetas en un forjado.
Fuente: (Arriaga et al, 2002)

A continuación se ilustra con un ejemplo un diagrama de momentos, para el cálculo de las piezas adosadas:



- A: zona que se debe reforzar.
- B: resistencia del elemento inicial.
- C: longitud de solape.
- D: refuerzo real que debe hacerse.
- E: aporte de resistencia del refuerzo.

Ilustración 52. Diagrama de momentos de viga.
Fuente: Propia

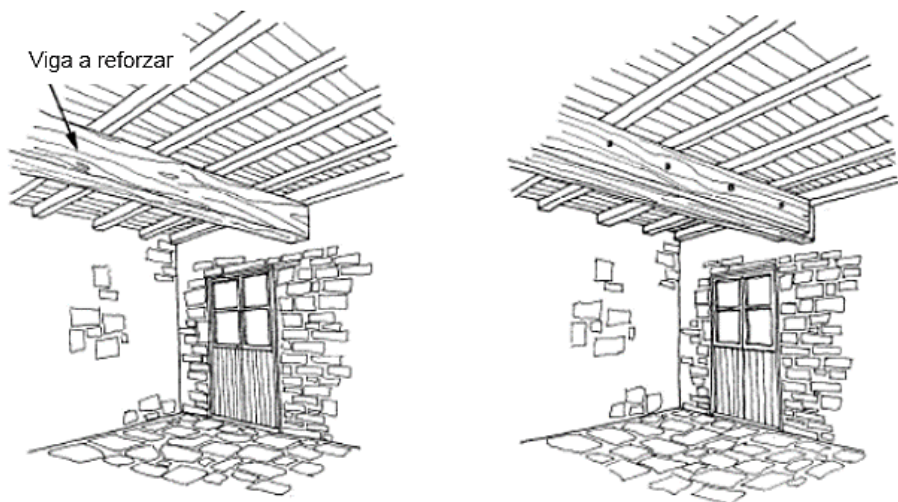
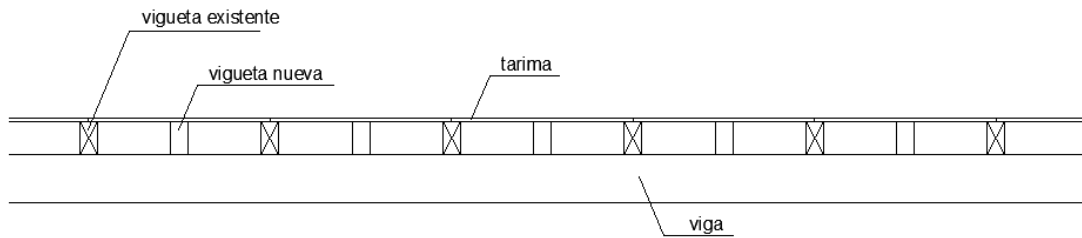


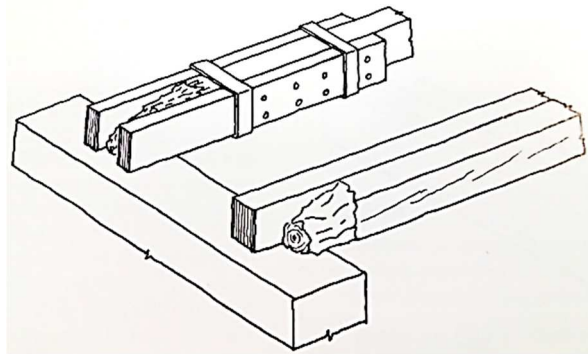
Ilustración 53. Solución con aporte de madera.
Fuente: (Valeri)

Otra opción tan eficaz como la anterior sería realizar el aporte de madera mediante el duplicado de viguetas (il.54), así el reparto de las cargas se divide, reduciendo a la mitad la carga absorbida por las viguetas existentes, tras la colocación de las nuevas.



*Ilustración 54. Sección forjado madera reforzado con duplicación de viguetas.
Fuente: Propia.*

Las soluciones anteriormente descritas suponen un refuerzo global en la estructura, pero en ocasiones el daño está localizado en ciertas zonas de la estructura, y con un pequeño arreglo puntual fácilmente se puede solventar el problema. Así pues, se presenta la opción de adjuntar una o varias piezas nuevas junto a la deteriorada, unidas mediante fijación mecánica, pernos o tirafondos (il.55). Con el fin de reforzar la zona y que ésta siga absorbiendo los esfuerzos que le corresponden.



*Ilustración 55. Refuerzo de viga en apoyo con piezas de madera.
Fuente: (Arriaga et al., 2002)*

- Colocación de prótesis de madera nueva.

El sistema consiste en la sustitución de la zona dañada por una pieza realizada con la misma geometría y con una madera análoga a la existente. El ensamble que une la pieza nueva con el resto de la estructura tras retirar la zona insana puede ser a tracción o compresión, según el esfuerzo que solicite a la pieza. Usualmente, la unión queda asegurada por elementos auxiliares metálicos (il.57, il.58) o bien por medio de un encolado (il.56).

Para la realización de dichas uniones es necesario controlar una serie de parámetros como son la temperatura de la madera, la humedad de la madera, y en cuanto al encolado vigilar la presión, el tiempo y la precisión de éste.

Además se precisará del apuntalamiento de la parte de la estructura afectada por la reparación debido a que momentáneamente el elemento estructural a reparar pierde toda resistencia.

Como ventajas de esta técnica se valora el mínimo impacto estético que ocasiona en la estructura reparada.

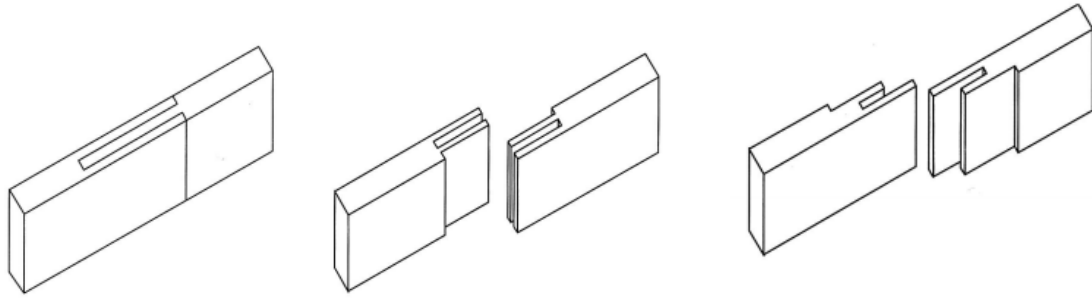


Ilustración 56. Consolidación de viga mediante madera encolada.

Fuente: (Landa Esparza)

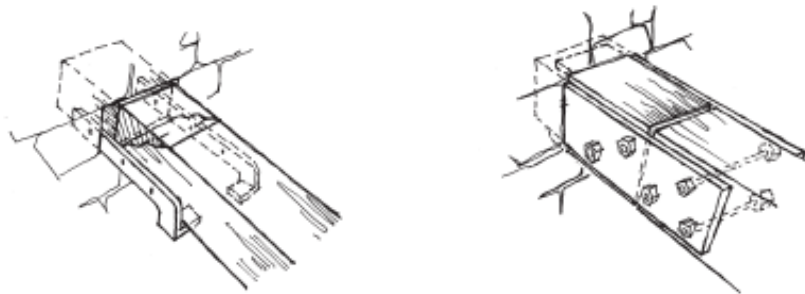


Ilustración 57. Prótesis de madera con unión reforzada con elementos metálicos.

Fuente: (Díaz Gómez)

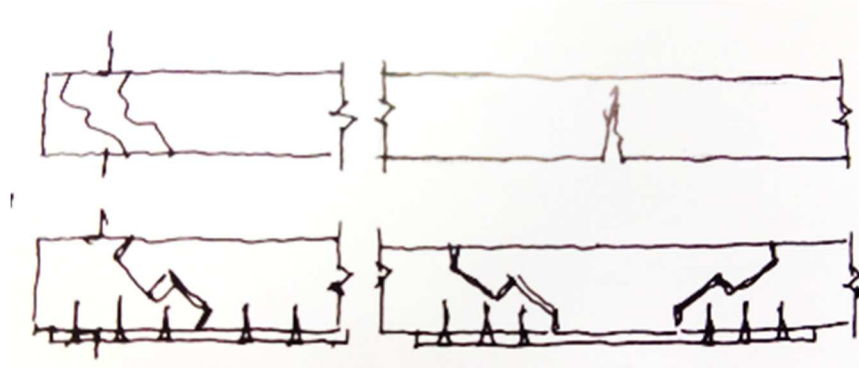


Ilustración 58. Solución con prótesis en cabeza y vano.

Fuente: (Arriaga et al., 2002)

5.2.4 Soluciones mediante utilización de acero

El refuerzo de las vigas mediante este sistema está muy extendido y ofrece múltiples soluciones. Este sistema, generalmente, se basa en el adosado de perfiles a las vigas o viguetas, unidas mediante elementos de fijación mecánicos (tirafondos y pernos). Esto proporciona una recuperación de la continuidad del elemento dañado, y aporta una gran estabilidad al conjunto de la estructura.

El planteamiento de reparación mediante refuerzos metálicos es una solución rápida y económica que garantiza la solidez de las estructuras donde se actúa. El único inconveniente que presenta es el valor estético que aporta, pues el acero queda visto. Por otra parte también hay que tener en cuenta su limitación ante su estabilidad al fuego.

A partir de ejemplos señalaremos distintas formas de consolidar un forjado con perfiles o pletinas.

- Refuerzo de una viga de madera con perfiles de acero laminado a ambos lados de la viga.

Esta solución se plantea en vigas en las cuales se produzca una falta de seguridad, como sería el exceso de flecha. Los motivos pueden ser varios, partiendo de un posible aumento de las sobrecargas de uso, degradación parcial de las vigas a causa de los agentes bióticos y abióticos, o por un mal dimensionado inicial resultando una sección insuficiente.

La descripción del método es la siguiente:

Se harán dos agujeros en la pared de los lados del apoyo de la viga afectada y se construirán dos dados de hormigón para repartir las cargas de las vigas de refuerzo. A continuación se colocarán dos perfiles laminados cogidos a ambos lados de la viga afectada (previa protección de sus cabezas). Luego se disponen los tornillos pasantes entre las dos nuevas vigas de refuerzo y la madera existente para que actúen a la vez. Se rellenarán de nuevo los agujeros hechos para apoyar las vigas de refuerzo. Se finaliza con la colocación de cuñas en el espacio entre las nuevas vigas y el techo para hacer entrar en carga el forjado.

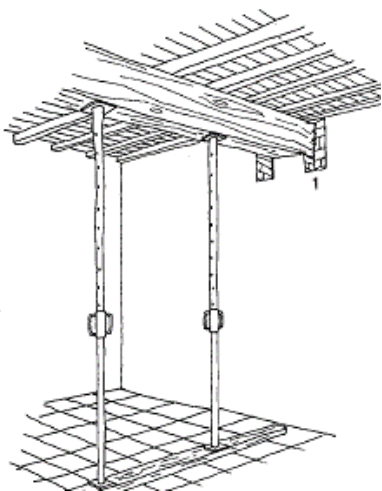


Ilustración 59. Apeo y apertura de huecos.
Fuente: (Valeri)

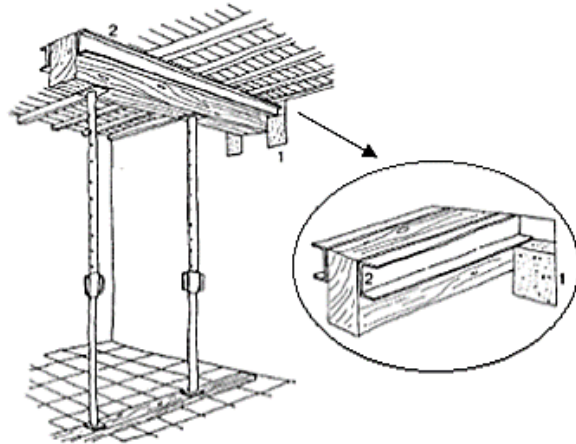


Ilustración 60. Colocación de perfiles.
Fuente: (Valeri)

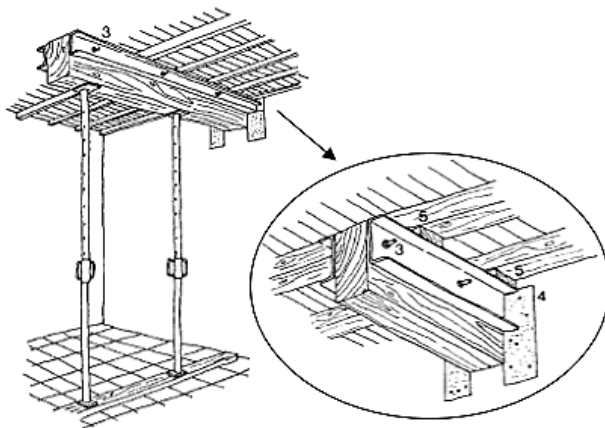


Ilustración 61. Fijación de perfiles.
Fuente: (Valeri)



Ilustración 62. Viga reforzada con perfiles metálicos.
Fuente: <http://goo.gl/PXhvpv> (10/05/2015; 10:39)

Al igual que en los refuerzos con madera, los daños pueden afectar a una zona muy concreta de la estructura, siendo innecesario el planteamiento de una solución global que acarrearía mayores gastos. De esta forma el arreglo puntual es la opción adecuada, a pesar de que estos refuerzos presenten una menor eficacia.

El las imágenes que se muestran a continuación se refleja el refuerzo en una cabeza de viga y una reparación puntual de una rotura.



Ilustración 63. Refuerzo en apoyo de viga de madera.
Fuente: <http://goo.gl/skplyT> (10/05/2015; 10:39)

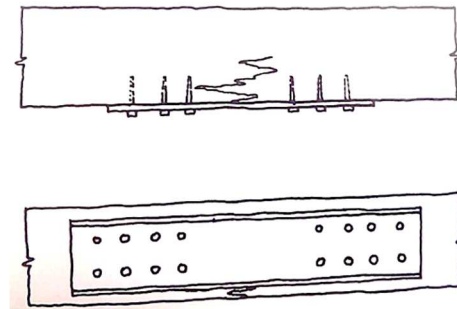


Ilustración 64. Reparación de una rotura con pletinas metálicas.
Fuente: (Arriaga et al., 2002)

- Refuerzo de una viga de madera con perfiles de acero laminado por su cara inferior.

Esta solución es similar a la anterior en cuanto a las anomalías que presenta la viga/vigueta para su intervención y las causas de las que derivan.

La ejecución del sistema consta de los siguientes pasos:

1. Se apea el tramo del forjado que apoya sobre la viga.
2. Se realiza un agujero en la pared, para construir un dado de apoyo de hormigón con el que se repartirán las cargas de la viga de refuerzo.
3. Se coloca el perfil de refuerzo (previa protección de su cabeza con pinturas antioxidantes) debajo de la viga dañada.
4. Se rellena el espacio entre la viga y el perfil de refuerzo con mortero o bien, con cuñas para hacerlo entrar en carga.

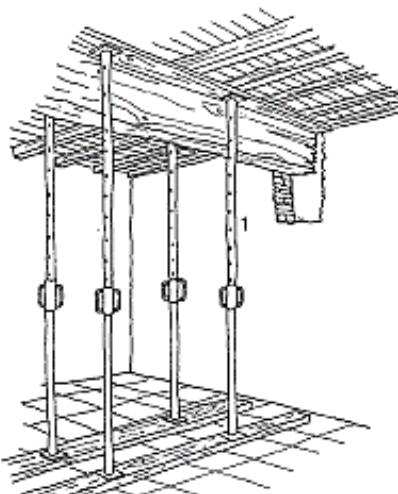


Ilustración 65. Apeo y apertura de hueco.
Fuente: (Valeri)

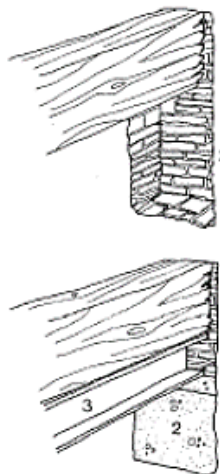


Ilustración 66. Elaboración de dado de hormigón y colocación de perfil.
Fuente: (Valeri)

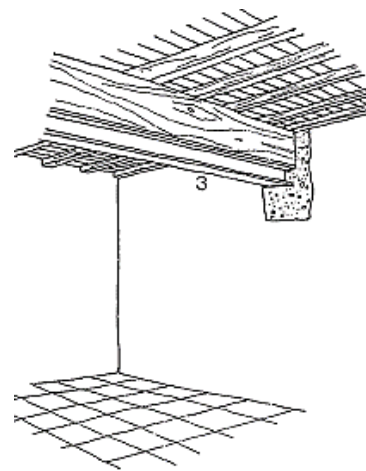


Ilustración 67. Viga reforzada.
Fuente: (Valeri)

- Refuerzo de una viga de madera mediante sistema estandarizado

Son numerosas las empresas que estudian la mejor forma de realizar un refuerzo mediante la colaboración de acero-madera. El acero es un material muy estudiado, que ofrece la posibilidad de crear infinitas secciones adaptándolas a cada situación. Esta gran variedad incentiva a que se busquen métodos propios que luego se patentan y se estandarizan.

En los siguientes párrafos se describirá un ejemplo de sistema estandarizado que se basa en la sustitución funcional de las vigas/viguetas deterioradas mediante la colocación, bajo las mismas, de una viga extensible de acero inoxidable o galvanizado capaz de asegurar la estabilidad del forjado en caso de pérdida total de resistencia a flexión de la viga/vigueta afectada. Este método está comercializado por empresas como son: “NOU/BAU”, “MECANOVIGA”, entre otros.

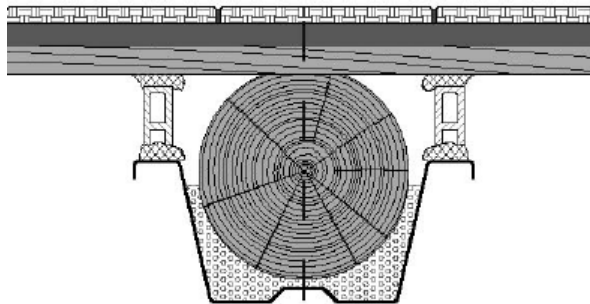


Ilustración 68. Sección viga reforzada con sistema estandarizado “NOU/BAU”

Fuente: Documentación de idoneidad técnica: N.º 271R/1;

<http://goo.gl/Y3RnRw> (04/06/2015; 12:40)

A continuación se refleja paso a paso como sería una llevar a cabo la colocación de un sistema estandarizado, en este caso se refleja el proceso que presenta la empresa NOU/BAU:

1. Se colocan, ligeramente inclinados, los dos perfiles extremos sobre puntales.

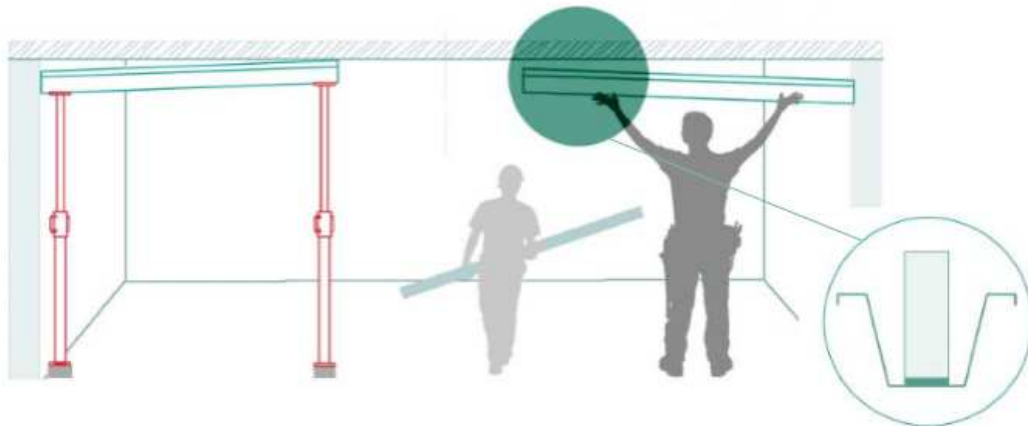


Ilustración 69. Colocación de los perfiles en los extremos.

Fuente: <http://goo.gl/7XlgiY> (04/06/2015; 17:51)

2. Se sitúa el perfil central, completamente horizontal, también sobre puntales.

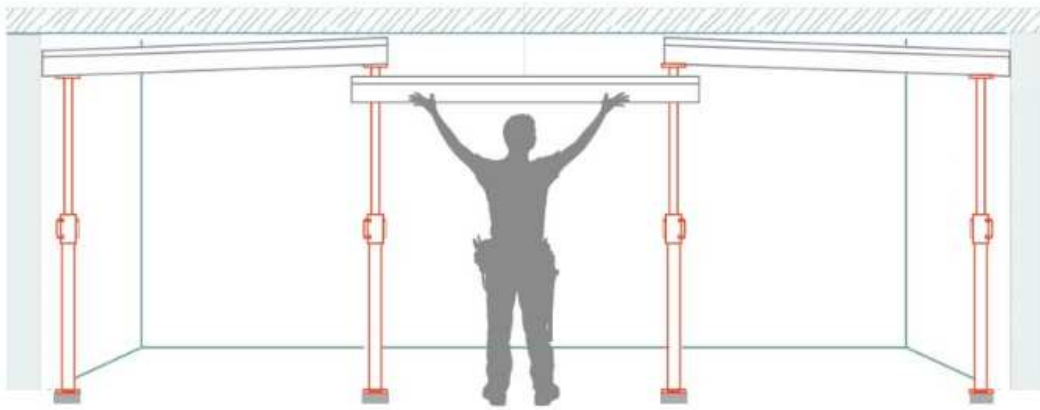


Ilustración 70. Ubicación del perfil central. Fuente: <http://goo.gl/7XlgiY> (04/06/2015; 17:51)

3. Se sueldan los tres perfiles

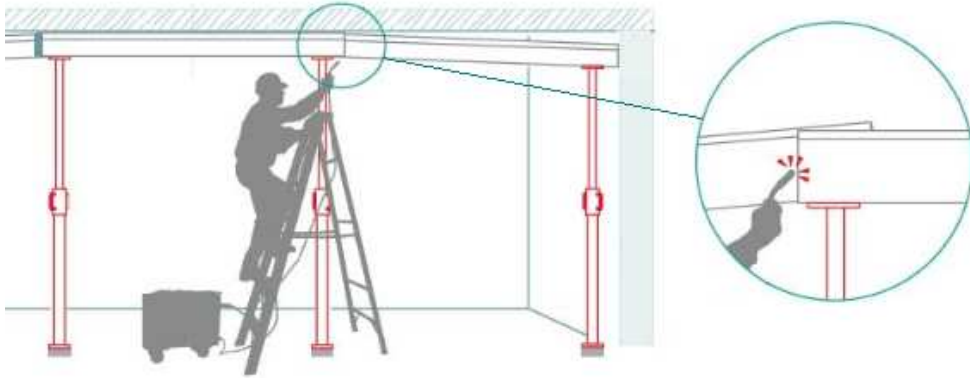


Ilustración 71. Soldadura del elemento lineal. Fuente: <http://goo.gl/7XlgiY> (04/06/2015; 17:51)

4. Se colocan los gatos hidráulicos en los extremos de la viga y para aplicar posteriormente los esfuerzos controlados de preflechado debajo de las dos cabezas de la viga NOUBAU

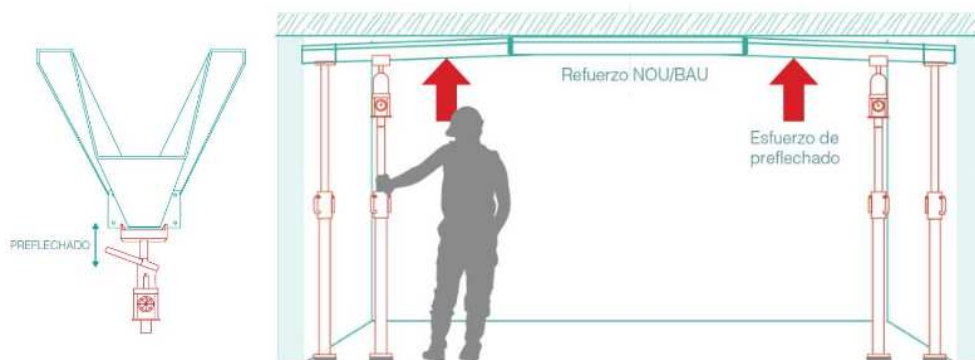


Ilustración 72. Colocación de gatos hidráulicos para aplicación de preflechado. Fuente: <http://goo.gl/7XlgiY> (04/06/2015; 17:51)

5. Cuando la viga está preflechada, se fijan los soportes a la pared, no es necesario la construcción de dados de hormigón.

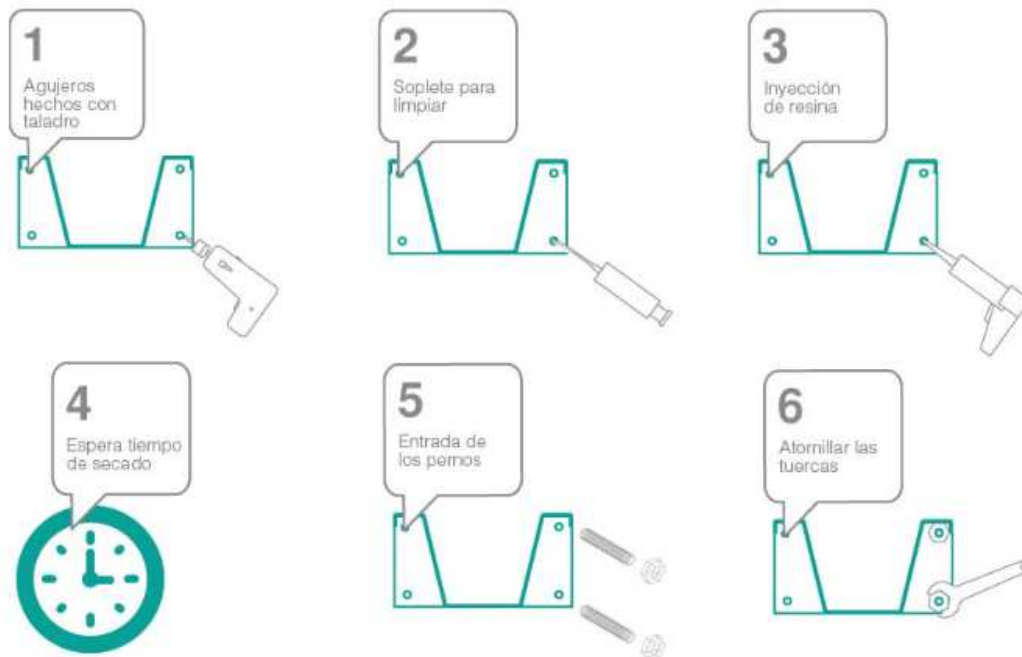


Ilustración 73. Fijación de los soportes. Fuente: <http://goo.gl/7XlgiY> (04/06/2015; 17:51)

6. Se impermeabilizan los soportes.
7. Se realiza el macizado del perfil NOUBAU.

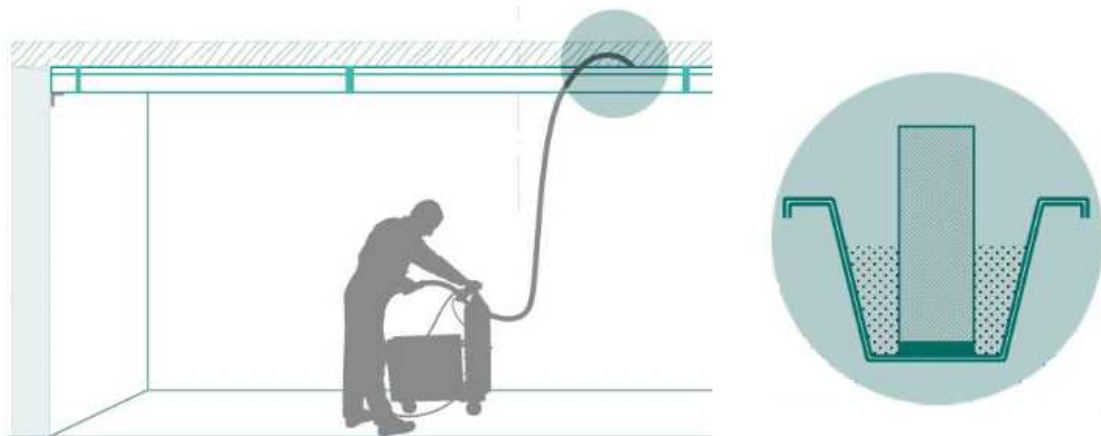


Ilustración 74. Proceso de macizado. Fuente: <http://goo.gl/7XlgiY> (04/06/2015; 17:51)

- Refuerzo de una viga de madera con pletina de acero.



Ilustración 75. Refuerzo con pletina de acero.
Fuente: <http://goo.gl/OiEjk6>
(06/05/2015; 21:27)

En contraposición con los ejemplos anteriores se plantea el siguiente sistema que permite reducir el impacto visual que supone el refuerzo con perfiles metálicos. Así, el planteamiento de este sistema nace de la problemática de la intervención, por la cara inferior, en elementos de patrimonio histórico artístico como puede ser el caso de los artesonados.

La intervención se efectúa por la cara superior, una vez descubierta la madera del forjado. La eliminación de los elementos que descansaban sobre la viga/vigueta a reforzar suponen una reducción de peso para la estructura de madera ya deformada. En el espacio que antes

ocupaban los materiales que constituían el solado, se puede disponer el refuerzo y una losa superior de forjado.

El proceso de ejecución consta de las siguientes fases:

Se realiza una incisión en la madera de una acanaladura donde se aloja la pletina o pletinas verticales inferiores. Posteriormente la pieza se acopla desde arriba sobre la madera. La completa unión acero-madera se lleva a cabo mediante el atornillado del metal, que hace que los dos materiales queden adheridos. Los tirafondos poseen longitud y sección diferente según el tipo de refuerzo que se emplea, y éste depende de la capacidad mecánica que se desea adquirir y de la escuadría de la pieza de madera a reforzar. Los tornillos siempre al tresbolillo en torno a las pletinas, se introducen de forma mecánica y sus últimas vueltas manualmente con una llave para evitar la rotura a torsión de los tirafondos.



Ilustración 76. Corte de la madera para introducir pieza.
Fuente: (González Bravo)



Ilustración 77. Atornillado, unión madera-metal.
Fuente: (González Bravo)



Ilustración 78. Refuerzo ensamblado en la viga.
Fuente: (González Bravo)



Ilustración 79. Relleno de la zona de entrevigado con mortero aligerado.
Fuente: (González Bravo)

Con este tipo de refuerzo se pretende realizar actuaciones de mínima incisión en las que no existe trabajo por debajo del forjado (apeos o puntales). Esta posibilidad de intervenir sólo por una de las caras facilita el régimen de programación de las obras, la ausencia de desalojo en viviendas o la influencia en zonas delicadas de obras de patrimonio histórico artístico.

- Refuerzo de una viga mediante atirantado metálico.

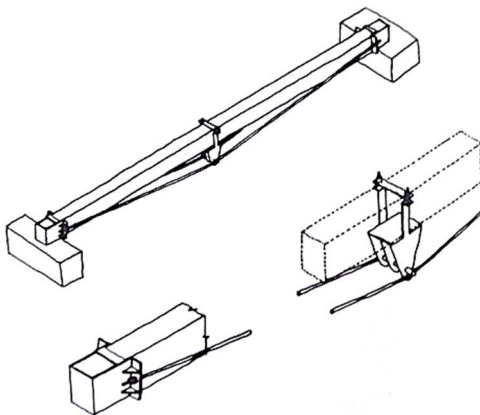


Ilustración 80. Refuerzo de viga mediante un tirante inferior.
Fuente: (Arriaga et al., 2002)

La disposición de tirantes de acero en la parte inferior de la viga permite aumentar la inercia de la pieza, quedando el tirante traccionado y la viga comprimida.

El tirante se apoya y se distancia de la viga a través de enanos metálicos que quedan comprimidos. Presenta el inconveniente de las dificultades de anclaje del tirante en los extremos de la pieza que en algún caso exigen desmontar la viga. (Arriaga et al., 2002).

5.2.5 Soluciones mediante sistemas FRP

Este sistema se realiza con materiales compuestos a base de polímeros reforzados con fibras, a los cuales se les conoce con las siglas FRP.

Gracias a los avances en la tecnología de materiales, los materiales compuestos a base de resina epoxi y polímeros reforzados con fibras (FRP) se han utilizado cada vez más para fines de refuerzo. De esta manera aparecen en el mercado polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRPs), fibra de vidrio reforzada con polímeros (GFRPs) y polímeros reforzados de fibra de aramida (AFRPs), entre otros.

Puesto que las fibras de vidrio presentan una resistencia deficiente en ambientes alcalinos y tienen menor resistencia a la fatiga y el módulo de elasticidad de las fibras de aramida es mucho menor que el de las fibras de carbono, los materiales CFRP parecen ser los más adecuados para el refuerzo en las estructuras de madera. (Nowak et al., 2013)

El refuerzo consiste en adherir externamente sobre la estructura láminas de FRP. Los sistemas de refuerzo empleado son varios y la elección depende de la aplicación particular:

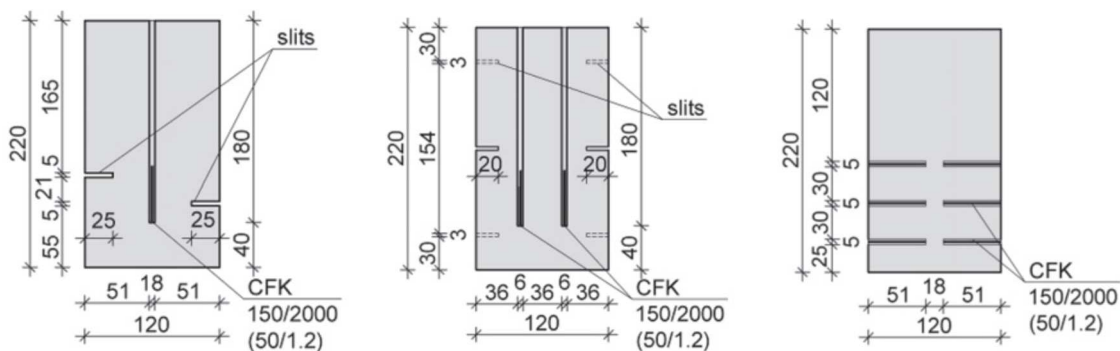
- Pegado de un laminado prefabricado: se pega al soporte mediante resina. Las láminas suelen ser de fibras unidireccionales.
- Colocación en húmedo: se impregna el soporte con resina y se colocan las láminas.
- La inyección de resina al vacío: la lámina se coloca sobre el elemento cubierto herméticamente. El vacío fuerza a penetrar la resina.



*Ilustración 81. Refuerzo de viga con sistema FRP.
Fuente: <http://goo.gl/KbVNAk> (10/05/2015; 17:25)*

Este sistema es muy adecuado para vigas y viguetas de forjados, ya que refuerza muy bien los elementos sometidos a esfuerzos de flexión. Otra virtud es su ligereza, y económicamente resulta atractivo por su bajo costo de instalación y su rápida puesta en obra.

Aunque en la mayoría de los casos las bandas se colocan externamente sobre la pieza a reforzar, las tiras de FRP ofrecen la gran ventaja de poder ser colocadas en distintas posiciones. De este modo, el material ofrece la posibilidad de ser colocado dentro de la sección transversal de la madera, lo cual resulta importante cuando es necesario reforzar elementos con valor histórico.



*Ilustración 82. Refuerzo con FRP en distintas posiciones.
Fuente: (Nowak et al., 2013)*

Estudios recientes (Corradi et al., 2007) han probado el uso de los compuestos FRP para la fabricación de perfiles utilizados para el refuerzo. Esto supone una gran ventaja a la hora de realizar los refuerzos, ya que son perfiles que aportan ligereza, evitando en ciertos casos el uso de maquinaria pesada y facilitando la puesta en obra.

La vinculación entre el perfil y la madera no es fácil, es necesario que el adhesivo que se utilice tenga una buena capacidad de relleno para que la unión entre los materiales sea la adecuada. En ocasiones, será conveniente utilizar fijaciones mecánicas para asegurar la unión mientras se produce el curado del adhesivo.



Ilustración 83. Colocación de perfil FRP.
Fuente: (Corradi et al., 2007)



Ilustración 84. Sistema mixto perfil FRP-madera.
Fuente: (Corradi et al., 2007)

5.2.6 Soluciones mediante formulaciones epoxi.

- Consolidación mediante barras encoladas.

Esta es una solución que consiste en la instalación de barras de refuerzo a modo de armadura en incisiones realizadas en la superficie de la pieza, pudiendo ser en los laterales, en la cara superior o inferior.

A continuación se describen dos situaciones diferentes en las que se aplica este sistema:

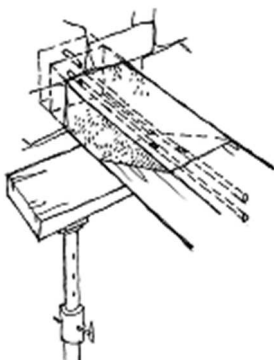


Ilustración 85. Sistema Beta.
Fuente: (Díaz Gómez)

Mediante el uso de estas resinas se lleva a cabo una solución basada en la sustitución de la parte dañada de la cabeza de la viga por un mortero de formulación epoxi que se conecta a la madera sana a través de barras de materiales compuestos, como es el caso de la resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio. Este sistema es llevado a cabo por empresas como: Promax “sistema Beta”, Rotafix o Drizoro.

Su ejecución se compone de los siguientes pasos:

Primeramente se realiza el apeo de la viga sobre la que se va actuar, luego se corta la zona degradada de la cabeza hasta dejar la zona completamente sana. Dicho corte suele realizarse de forma transversal (il.86), aunque lo más conveniente es la realización de cortes oblicuos (il. 85) o con un cierto dentado (il. 87) para mejorar la transmisión de los esfuerzos de corte.

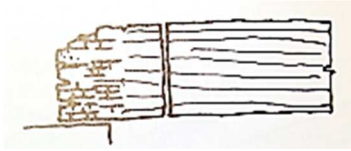


Ilustración 86. Corte transversal.
Fuente: (Arriaga et al., 2002)



Ilustración 87. Corte dentado.
Fuente: (Arriaga et al., 2002)

Posteriormente se realizan los taladros en la zona sana de la madera, para la colocación de las barras de refuerzo. Estos deben tener un diámetro mayor al de la barra a introducir para facilitar el llenado con la formulación. Generalmente, los taladros se inician desde la cara superior de la viga con un ángulo de 20 a 30 °. Hay casos en los que debido a que no es posible el acceso desde la cara superior se ve en la obligación de trabajar desde abajo y sobre las caras laterales, esto implicaría que los taladros se realizan en planos horizontales y con dirección oblicua respecto al eje de la viga.

Se disponen las barras de refuerzo en los orificios, y se continúa realizando el montaje de un encofrado que restituye la parte pérdida de la madera. El encofrado puede ser construido con tablero de partículas si es desechable, aunque a veces se opta por encofrados de madera que quedan vistos, ocultando la parte de mortero epoxi.

Se vierte el mortero constituido por la resina epoxi. Y finalmente, se rellenan las holguras que quedan entre las barras de conexión y la madera con una formulación epoxi más fluida para anclar las barras.

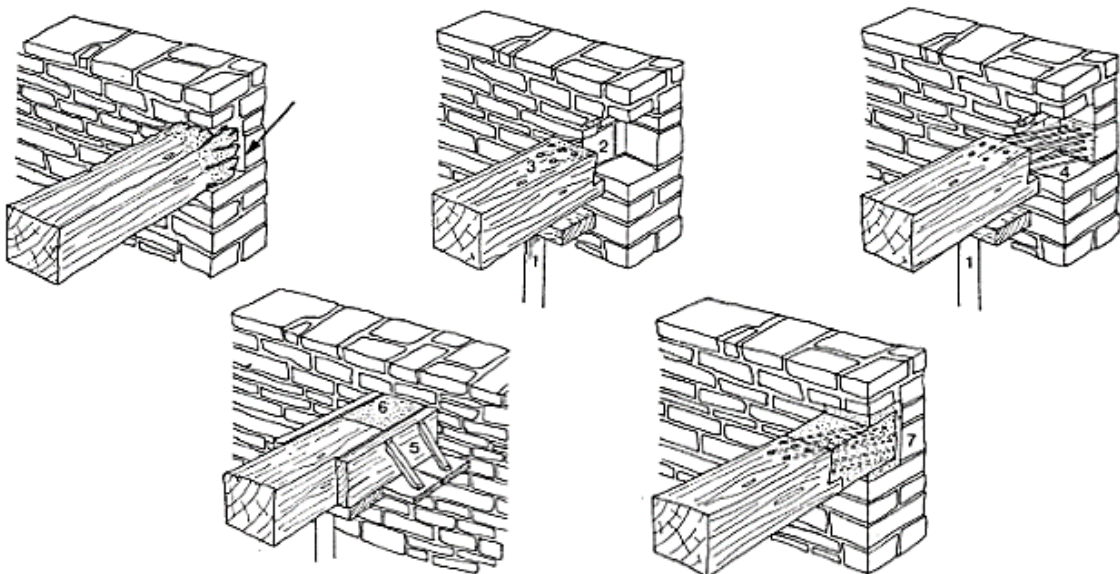


Ilustración 88. Proceso sistema Beta en encuentro viga-muro.
Fuente: (Díaz Gómez)

El ejemplo anterior muestra que la prótesis se realiza con resina, pero el método de consolidación mediante barras también puede utilizarse para el cosido de una prótesis de madera.

En las secciones de grandes escuadrías es inevitable la aparición de grandes fendas que tienden a dividir la sección original en dos piezas acopladas. Estas fendas afectan

al plano medio de la sección y son debidas al secado de la madera. La colocación de barras encoladas permite realizar el cosido de las fendas, restableciendo parte de la capacidad resistente de la pieza afectada.

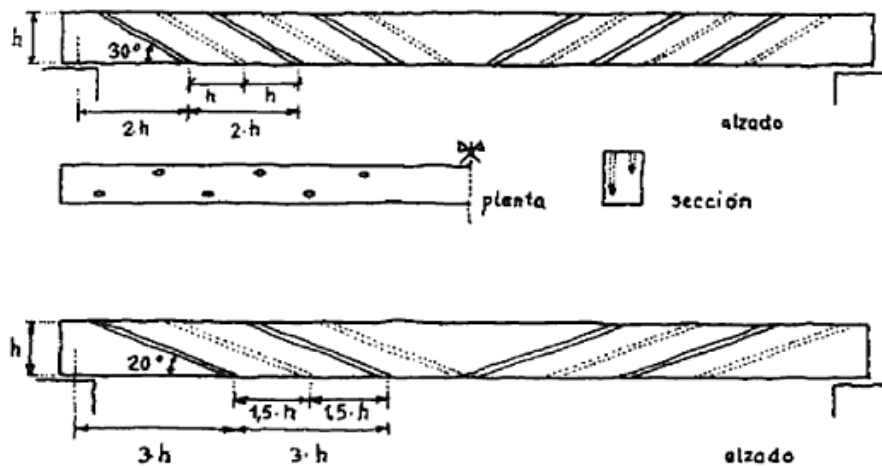


Ilustración 89. Esquemas de cosido.
Fuente: (Arriaga et al., 2002)

Esta solución resulta ventajosa si valoramos que se produce una reducción de la flecha de la viga, por el efecto de la rigidización. En cambio, hay que señalar que la aplicación no es nada sencilla, ya que la resina puede escaparse por cualquier fenda u orificio que no haya sido perfectamente sellado. También debe tenerse en cuenta que, antes de tomar la decisión de su empleo, si la disminución de la deformación, con la incertidumbre que conlleva el no poder cuantificar de antemano su efecto, compensa en relación al trabajo a realizar y su coste.



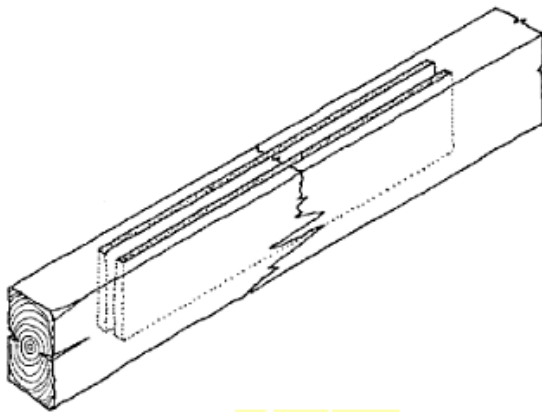
Ilustración 90. Proceso del cosido con varilla de fibra en una viga.
Fuente: <http://goo.gl/ZyUXh2> (09/05/2015; 13:54)

- Consolidación con placas de refuerzo internas

Esta solución es una de las más cómodas para ejecutar y aporta una gran rigidez en la conexión.

La viga colocada en posición original se apea, luego desde la cara superior se realizan cajeados para introducir al menos dos placas de refuerzo con una longitud de anclaje suficiente para la transmisión del momento flector y cortante que se den en la sección. El anclaje siempre se debe realizar sobre la madera sana.

Tras tener claro donde se van a alojar las placas, realización de marcados o guías, se procede a instalar el refuerzo tal que así:



- Realización de cajeados con anchura suficiente para permitir el vertido de la formulación.
- Vertido de la formulación epoxi hasta alcanzar una tercera parte de la profundidad del cajeadado.
- Introducción de las placas de refuerzo procurando que la resina fluya por las holguras.
- Completar el llenado hasta enrasar con la cara superior de la pieza.

*Ilustración 91. Viga con placas de refuerzo.
Fuente: (Arriaga et al, 2002)*

Hay que contemplar también que si se presentara la posibilidad de que en la pieza a reconstruir, el vano presentara daños por pudrición, a pesar de que el proceso es similar al anteriormente redactado, tendremos que tener la precaución de comenzar a contar el anclaje en la madera sana descontando la zona dañada.

5.2.7 Soluciones con sistema mixto madera-hormigón

La adición de losas de hormigón armado conectadas a las viguetas de madera de los forjados es una de las soluciones más utilizadas actualmente en intervenciones de rehabilitación edificatoria.

La solución se fundamenta en la transformación de las viguetas existentes en vigas mixtas de madera y hormigón, consiguiendo repartir las tensiones de la flexión de forma coplanaria en todas las direcciones del plano del forjado y aumentando así la rigidez global de la edificación cuando se enlaza la nueva chapa con los muros gruesos perimetrales. La conexión de la nueva losa con el muro existente constituye el aspecto más crítico de este tipo de refuerzo, al verse condicionada por las características de rigidez, cohesión y perforabilidad de los muros.

Para la elaboración de este sistema se dispone una capa de hormigón, armado con un mallazo, sobre las viguetas del forjado debidamente vinculada a través de conectores. El hormigón trabaja como cabeza comprimida y la madera predominantemente a tracción. El peso de la solución resultante no es muy elevado, ya que el grueso de la capa de hormigón es reducido (5 a 8 cm). (Arriaga et al., 2002).

Por tratarse de una sección mixta, es muy necesario unir las dos partes de la sección de forma que trabajen conjuntamente como una sección única. Para ello se pueden utilizar diversos sistemas o tipos de conector. El comportamiento a flexión de la sección conjunta de la madera y el hormigón depende de la rigidez de la unión, la cual varía según el tipo de conector. Partiendo de esta importancia del conector se analizarán varios tipos, que se agruparán en dos grandes apartados: conectores continuos y puntuales.

- Continuos:

a) Ranura en la madera y conexión por la adherencia del hormigón. Se realiza una acanaladura lo suficientemente ancha y profunda en la viga para que el hormigón que forma la capa de compresión pueda penetrar formando una conexión de tipo continuo; en este caso, existe el peligro de una rotura frágil debido a que en la zona donde se van a transmitir los esfuerzos rasantes no hay armadura a cortante. Además esta forma de conexión no es muy recomendable debido a la ausencia de una sujeción mecánica complementaria, que reforzara la unión hormigón-madera.

b) Resaltos en la viga. Realizados en la cara de contacto con el hormigón, están siempre complementados por otro tipo de conector (clavos, tornillos) que puedan absorber los efectos de despegue entre los dos materiales, ya que los resaltos solo responden frente a esfuerzos rasantes en una dirección y no son capaces de transmitir las pequeñas tracciones que se desarrollan para que ambas secciones flexionen por igual.

c) Chapa metálica continua. Colocada en la viga de madera donde se ha practicado previamente una acanaladura para alojarla, fijándola con resina sintética o en seco mediante bulones; es precisamente esta chapa, la encargada de transmitir los esfuerzos rasantes entre hormigón y madera.

d) Barra en zig-zag anclada. Dispuesta dentro de una acanaladura realizada en la viga de madera, consiguiendo mejor anclaje tanto en el hormigón como en la madera así como un ahorro importante en peso y por tanto en economía.

e) Chapa perforada o grecada. Anclada a la viga de madera en seco mediante clavos o tornillos.

d) Adhesivos: la unión madera-hormigón se realiza mediante encolado, a través de adhesivos que presentan buena capacidad de relleno para asegurar una correcta vinculación entre los materiales. Este sistema conduce a desviaciones más pequeñas y a un mejor comportamiento compuesto que los sistemas basados en el uso de conectores, puesto que la limitada rigidez de la unión con conectores, permite ciertos deslizamientos, dando lugar a un comportamiento semi-rígido. (Negrão, João H. et al.)

- Puntuales:

a) Clavos o tornillos en seco. Colocados en seco sobre la madera, ofrecen bien el vástago o bien una cabeza de forma alargada para transmitir esfuerzos rasantes.

b) Barras de acero corrugado para hormigón. Se anclan a la madera mediante un taladro previo y posterior relleno de resina epoxi, mientras que en el hormigón la conexión se produce por adherencia.

c) Tubos metálicos de acero con zona dentada. Para fijar sobre la viga de madera mediante presión, aunque se realiza una perforación previa; en algunos casos, se complementa con la adición de resinas epoxi.

d) Chapas dobladas, ancladas. Similar en ejecución a los conectores formados por clavos, es decir, se ejecutan en seco mediante clavado.

e) Cilindros de hormigón empotrados en perforaciones de la madera. Para conseguir un efecto similar a los conectores metálicos, se ejecutan unos taladros de mayor diámetro que en el caso de barras de acero sobre la vigueta de madera, que posteriormente son ocupados por el mismo hormigón que forma la cabeza de la sección mixta.

Existen multitud de soluciones para materializar los tipos de conexión enunciados, a continuación se muestran algunos ejemplos:

- Sistema mediante conectores Tecnaria.

Consiste en la ejecución de una solera de hormigón armado aligerado, solidarizada a viguetas de madera mediante conectores de perno y crampones Tecnaria, (il.92, il.93).

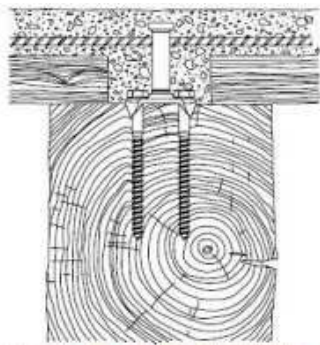


Ilustración 92. Conector BASE.
Fuente: <http://goo.gl/thsiQ0> (09/06/2015; 20:25)

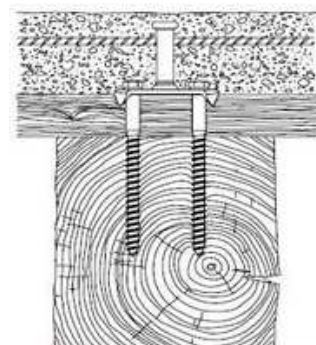


Ilustración 93. Conector MAXI.
Fuente: <http://goo.gl/thsiQ0> (09/06/2015; 20:25)

- Sistema con vinculación mediante uso de barras de acero corrugado.

Los conectores son barras de acero corrugado, colocados en perforaciones realizadas en la vigueta de madera y fijados con resina sintética, que transmiten esfuerzos al hormigón por adherencia.

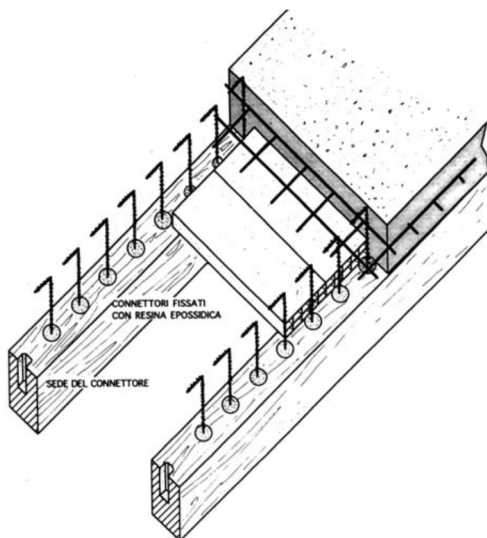


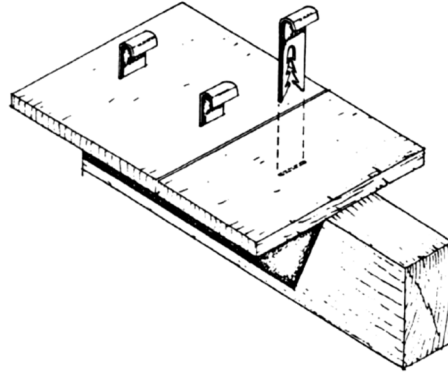
Ilustración 94. Sistema con barras de acero corrugadas.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)



Ilustración 95. Forjado mixto con vinculación mediante uso de barras de acero corrugado.
Fuente: <http://goo.gl/CTqJB1> (09/06/2015; 22:25)

- Sistema con vinculación a través de chapa metálica doblada.

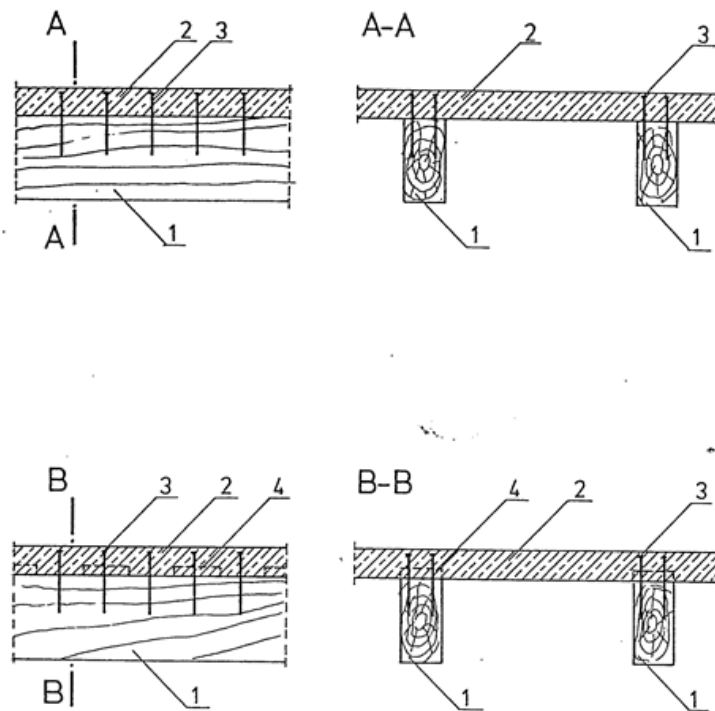
Los conectores están formados por chapa metálica doblada, parcialmente clavada en la vigueta de madera y embebida en la capa de hormigón; el tablero que sirve de encofrado, bajo ciertas condiciones, puede tener función resistente.



*Ilustración 96. Sistema con conectores de chapa metálica doblada.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)*

- Sistema mixto patentado por Godycki-Cwirko, Kleszczewski, Pawlica y Romanowska.

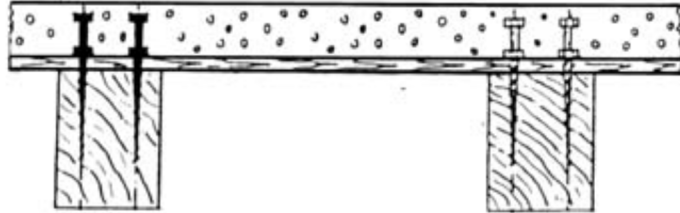
El sistema consiste en hacer resaltos en la superficie de la vigueta de madera que va a estar en contacto con la solera de hormigón a fin de poder transmitir el esfuerzo rasante, complementándose con la utilización de conectores tipo clavo para evitar el despegue entre ambas secciones.



*Ilustración 97. Sistema Godycki, Pawlica, Kleszczewski, Romanowska.
Fuente: <http://goo.gl/vtYlhS> (11/05/2015; 17:55)*

- Sistema con vinculación por conector estándar AL-FER.

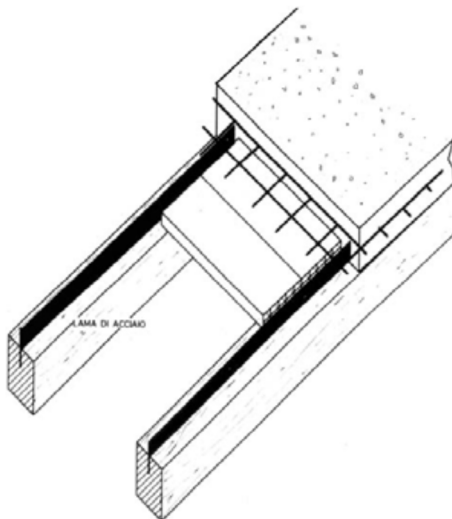
Sistema de conectadores roscados sobre la vigueta de madera con un resalto que sirve de anclaje a la sección de hormigón; el detalle se completa con un tablero que sirve solamente de encofrado perdido, sin entrar a formar parte de la sección resistente. El diámetro del conector es $\varnothing 16$ mm y la longitud total es de 160 mm. Este tipo de conectores los comercializa la empresa AL-FER.



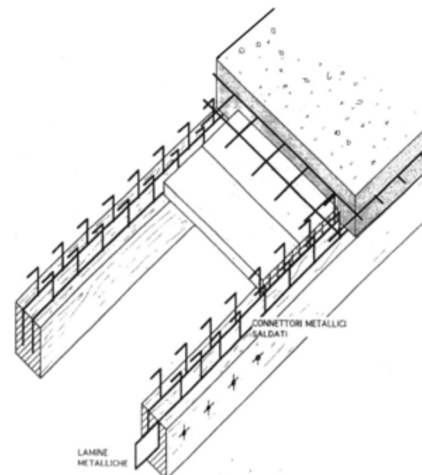
*Ilustración 98. Vinculación mediante conector AL-FER.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)*

- Sistema patentado por Gennaro Tampone, Luigi Campa

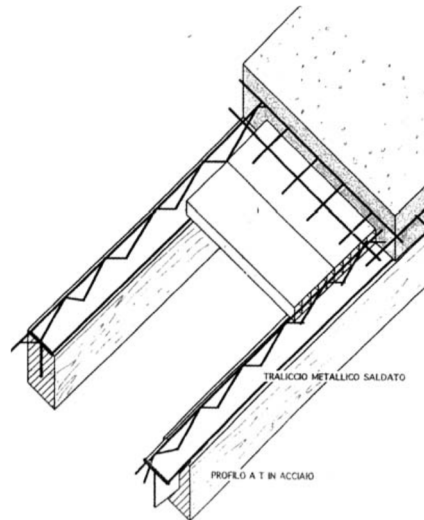
El sistema consiste en incrustar una o varias chapas metálicas en la vigueta, uniéndolas con resinas epoxi o bien en seco mediante bulones; de este modo, se mantiene la continuidad en las fibras de la madera y, para conseguir el anclaje con el hormigón se coloca una barra de acero doblada en zig-zag o bien conectadores tipo barra, unidos a la chapa por soldadura.



*Ilustración 99. Chapa metálica sin más elementos.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)*



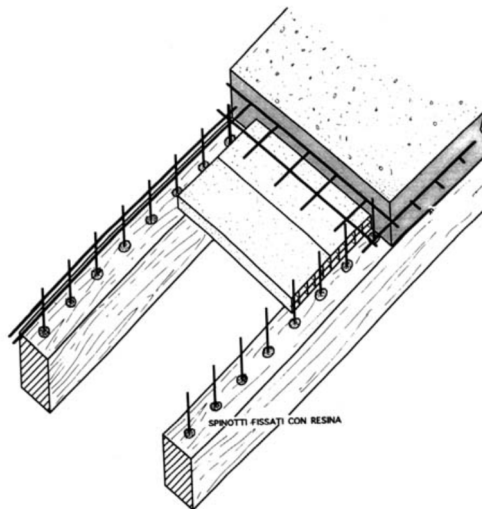
*Ilustración 100. Chapa metálica adherida a la madera con bulones y al hormigón mediante conectadores tipo barra.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)*



*Ilustración 101. La chapa es un perfil en T, pegado a la madera con resinas epoxi y anclado al hormigón por una barra en zig-zag.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)*

- Sistema Alessi, Raffagli, Lamborghini.

Sistema formado por barras rectas de acero incrustadas en taladros practicados en la vigueta de madera y fijados con resina sintética; el detalle se completa con dos barras de acero dispuestas en sentido longitudinal embebidas en el hormigón, con el fin reforzar la conexión en la superficie de contacto entre los dos materiales.



*Ilustración 102. Sistema Alessi, Raffagli, Lamborghini.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)*

- Sistema de vinculación mediante resaltos en la madera, reforzados con tornillos.

Resaltos en la vigueta de madera para transmitir el esfuerzo rasante complementados con conectadores tipo tornillo o clavos, a fin de evitar el despegue entre las dos secciones.

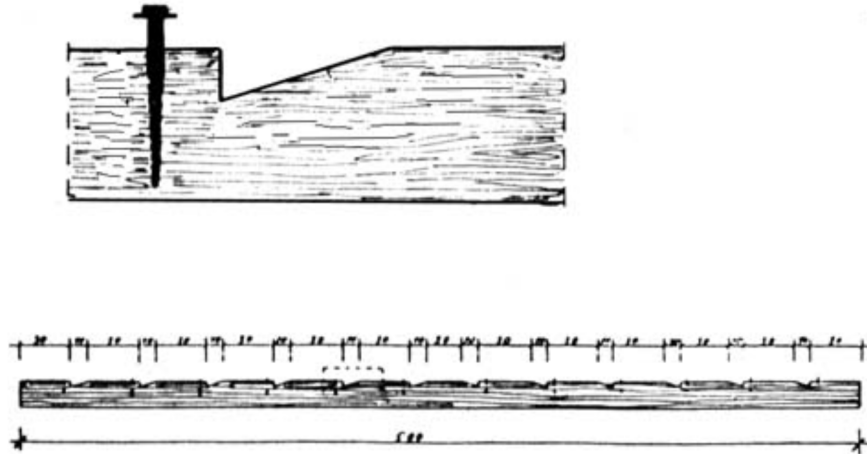


Ilustración 103. Sistema de resaltos con fijaciones metálicas.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)

- Sistemas con vinculación mediante cajeadado en elemento de madera.

En este caso, se consigue una conexión continua mediante la formación de una acanaladura en la vigueta de madera completando la sección con la adición de hormigón; existe la posibilidad de rotura frágil, debido a que la zona encargada de transmitir los esfuerzos rasantes, no está armada.

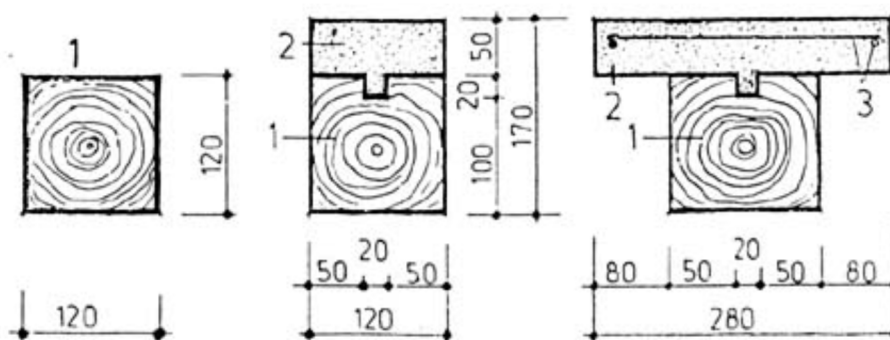


Ilustración 104. Sistema con acanaladura en vigueta.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)

- Sistema Cecchi

Sistema de conectores tipo barra, que van desde la vigueta a la solera formada por un tablero sobre listones; aparece por tanto una zona en la sección mixta en la cual no hay hormigón, trabajando la conexión a esfuerzo cortante y flexión.

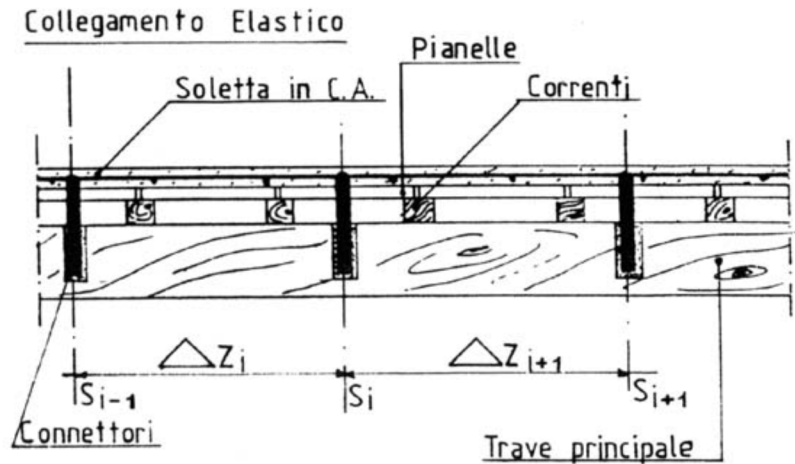


Ilustración 105. Sistema Cecchi.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)

- Sistema mediante unión de conectores metálicos tubulares.

El sistema está formado por tubos metálicos de 70 mm. de diámetro incrustados en la vigueta de madera previamente perforada. Este tipo de sistema lo desarrolla la casa comercial "sylvabat".

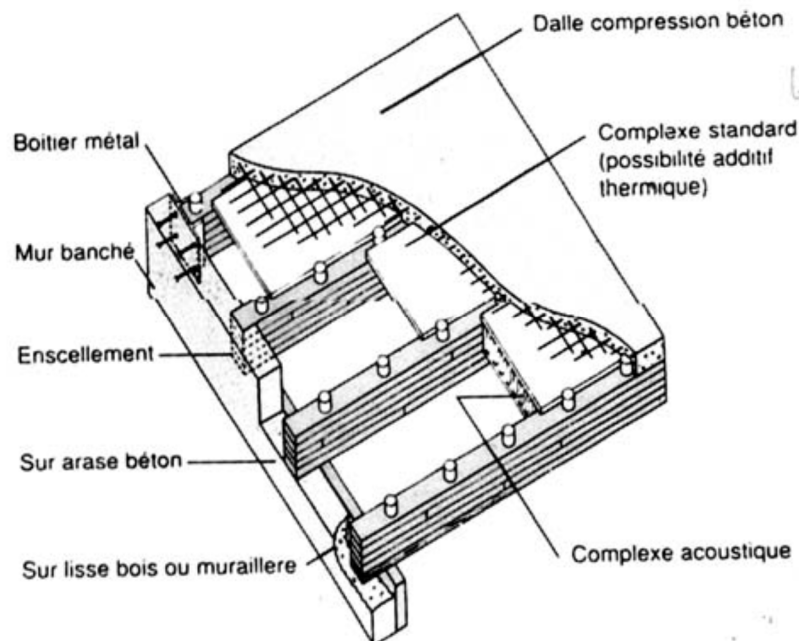


Ilustración 106. Sistema con conectores tubulares.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)

- Vinculación madera-hormigón mediante agujeros cilíndricos.

Consiste en la formación de huecos cilíndricos taladrados en la madera, que son ocupados posteriormente por el hormigón que forma la solera. La conexión formada por los cilindros de hormigón es puntual. Este sistema es realizado por la empresa “Wood Beton (grupo Nulli)”.

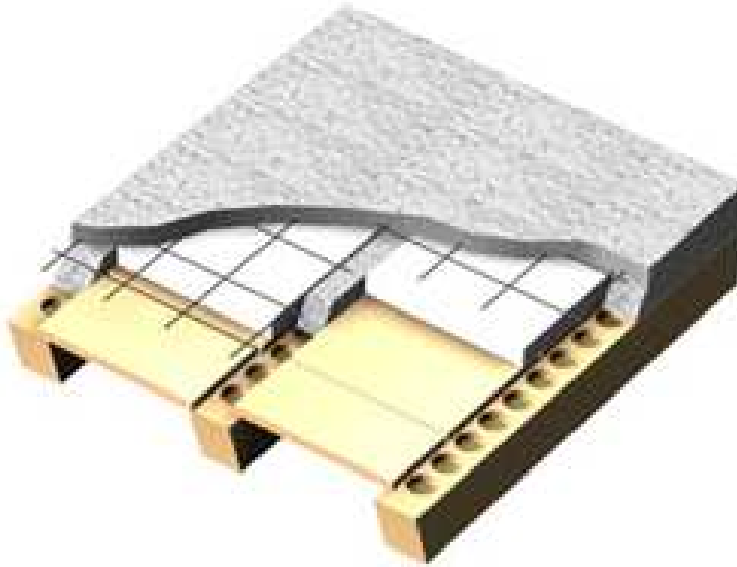


Ilustración 107. Sistema Wood Beton.
Fuente: <http://goo.gl/jmuBC7> (09/06/2015; 20:25)

- Sistema Llear, RBD.

El sistema de conexión, es una barra metálica en zig-zag fijada a la vigueta de madera mediante una acanaladura practicada en esta y posteriormente rellena con resina epoxi. Este sistema supone un salto cualitativo respecto a los anteriores, debido a la facilidad de puesta en obra y economía en la colocación de la conexión. El sistema está comercializado con la empresa RBD.

En sus inicios la conexión consistía en un elemento de acero doblado de forma triangular y reforzado por dos redondos soldados (ver il. 110) para pasar posteriormente a la barra metálica en zig-zag, eliminando las dos longitudinales que no están contribuyendo a transmitir el esfuerzo rasante (ver il. 111).

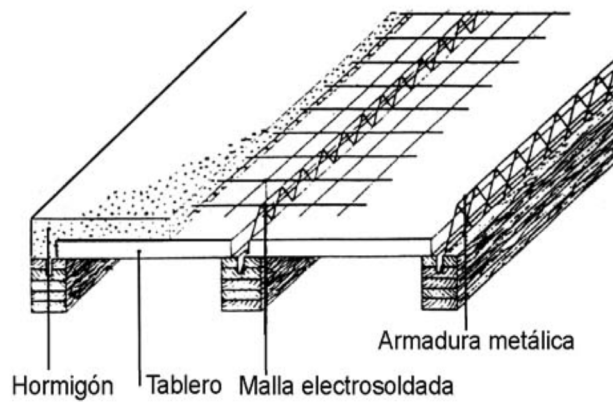


Ilustración 108. Sistema Llear, primera generación.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)

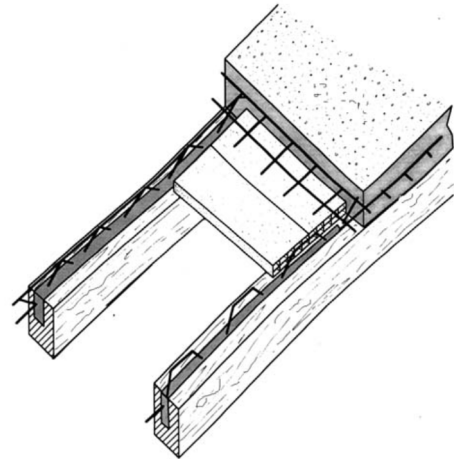


Ilustración 109. Sistema Llear, segunda generación.
Fuente: (PARDO ROS, 1997)

▪ Sistemas de unión VB

El sistema consiste en vincular la madera y el hormigón a través de conectadores con filete para roscar en la madera y cabeza alargada en la zona de conexión con la solera de hormigón. Este tipo de conector se comercializa a través de la empresa "Rothoblaas".



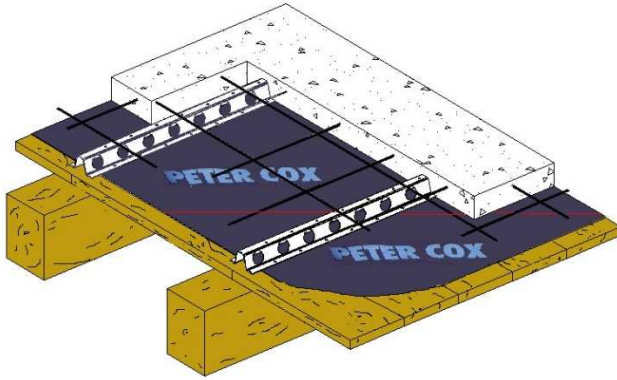
Ilustración 110. Sistema con unión VB.
Fuente: (Rothoblaas, 2015)



Ilustración 111. Conector VB.
Fuente: (Rothoblaas, 2015)

- Sistema L.P.R., Peter Cox

La conexión se consigue mediante la colocación de una chapa metálica doblada con perforaciones y fijada en seco a la madera mediante tornillos o clavos.



*Ilustración 112. Sistema L.P.R., Peter Cox.
Fuente: <http://goo.gl/eZrya> (09/06/2015)*

- Sistema con conector Flap, Peter Cox.

Unión de tuberías de metal con fondo perforado. Es un conector normalmente utilizado como complemento otros sistemas enlace.



*Ilustración 113. Conector tipo Flap, Peter Cox.
Fuente: <http://goo.gl/ipFFch> (10/06/2015; 11:16)*

Los sistemas mixtos madera-hormigón tienen el inconveniente de que es necesario levantar todos los elementos existentes por encima del forjado (pavimentos, tabiques, etc.) para poder colocar el hormigón. Por otra parte, la operación aunque de forma mínima, puede aumentar el canto del forjado, cosa que origina dificultades con las puertas, el acceso desde la escalera, etc. (Bellmunt i Ribas, 2003).

6. Conclusión: Comparativa entre los diferentes métodos.

Es bien conocido que el refuerzo/consolidación de estructuras es una de las labores más complejas y exigentes para los técnicos. El gran abanico de circunstancias que envuelve una obra, como por ejemplo: compatibilidad de materiales, emplazamiento, medios auxiliares... son los condicionantes que aportan dificultad y complejidad a la hora de realizar una intervención. Pero, aunque parezca una contradicción, el análisis de estas circunstancias permitirá al técnico decantarse por el mejor método de refuerzo.

Buscando una fácil comprensión de las diferencias que supone el empleo de uno u otro sistema, y así poder establecer una buena comparativa entre los métodos citados en el apartado anterior, se irán enumerando una serie de parámetros sobre los que se elaborará la discusión comparativa.

Empezaremos por discernir entre los métodos que tienen un carácter de refuerzo global en la estructura frente a aquellos que se realizan para solventar daños puntuales. Esta clasificación es importante, puesto que supondría ganar tiempo y dinero si evaluamos correctamente la necesidad de establecer uno u otro refuerzo.

Partiendo de esta base, ¿cuándo sería necesario establecer un refuerzo global? Para poder responder correctamente a la pregunta, es necesario señalar que cuando hablamos de refuerzo global lo hacemos englobando dos vertientes: refuerzos realizados sobre el conjunto del forjado y refuerzos que se elaboran sobre la totalidad de un elemento concreto de la estructura. Ambos son considerados refuerzos globales, y se emplean en situaciones donde el alcance del daño afecta de manera generalizada a una zona o elemento. Estos sistemas están orientados a buscar un aumento o refuerzo de la capacidad portante del conjunto del forjado, debido a que el problema no afecta sólo a un punto aislado.

Por otro lado, es habitual observar en las estructuras de madera que los agentes bióticos a menudo se concentran en los apoyos de las vigas y viguetas, ya que son los lugares por excelencia donde se producen las condiciones de humedad y oscuridad que contribuyen a su desarrollo. En estos casos, lo necesario suele ser la sustitución o el refuerzo de los apoyos afectados por la descomposición de la madera. Esto nos lleva a la realización de una reparación en zonas o puntos muy concretos. Con este ejemplo mostramos que el grado de generalización de la problemática es puntual, y la correcta solución sería emplear un refuerzo aislado.

Tanto en los refuerzos puntuales como en los globales, es importante tener en cuenta las características de las zonas adyacentes donde se apoyen los elementos reforzantes, así como las técnicas para su colocación, para evitar causar más daños en la estructura.

Por último hacer referencia a que la colocación de refuerzos puntuales presenta una menor eficacia que aquellos que se proyectan de manera global.

A continuación agrupamos en una tabla los distintos sistemas de refuerzo, distinguiendo aquellos preparados para solucionar un daño generalizado frente a los que solventan problemas puntuales.

Figura 5. Clasificación refuerzos globales vs puntuales.

	Refuerzo global del forjado	Refuerzo global de un elemento estructural	Refuerzo puntual
Apeos	X		X
Parteluces - Jabalcones	X	X	
Sistemas con aporte de madera			
▪ Duplicación de viguetas	X		
▪ Prótesis			X
▪ Piezas que abarcan la longitud de un elemento	X	X	
Acero			
▪ Perfiles/pletinas	X	X	X
▪ Atirantado metálico	X	X	
Resina epoxi			
▪ Bandas FRP	X	X	
▪ Perfiles FRP	X	X	
▪ Prótesis			X
▪ Placas/Barras de refuerzo interno	X	X	X
Madera-hormigón	X		

Otro parámetro a tener en cuenta a la hora de una correcta elección del sistema de reparación sería la localización del refuerzo. Las reparaciones se realizan con la ayuda de diferentes materiales: madera, acero, hormigón, resinas epoxi, etc. Según sea el material la ubicación recobra gran importancia, ya que no suponen el mismo impacto visual unos materiales que otros, ni ofrecen la misma facilidad de colocación.

Por lo tanto la ubicación para la consolidación en estructuras puede ir, en una zona lateral, inferior, superior o incluso en el interior, según sea el caso. Se escoge la situación superior o interior, cuando es preciso conservar la apariencia del forjado existente por poder considerarse una pieza histórica con gran valor cultural, presencia de pinturas o falsos techos valiosos. La situación inferior es la más frecuentemente, usada en el refuerzo de viguetas en forjados siempre que se presente la posibilidad de reducción de la altura libre de las estancias que cubren. En cambio la colocación lateral es la más usual en el refuerzo de vigas de madera que soportan tramos enteros de forjados de viguetas, conformándose generalmente con dos piezas unidas con elementos pasantes a través de la viga a reforzar.

Figura 6. Comparativa según situación del refuerzo sobre elemento a reforzar.

Localización	Observaciones
Interior	
	Suelen ser refuerzos realizados con materiales como: resina epoxi, láminas de fibras de carbono o de vidrio, placas metálicas. Con esta ubicación se consiguen aumentos de la capacidad portante en las piezas de forma discreta, las operaciones buscan disimular el impacto visual que supone el refuerzo. Permiten una buena conservación de la estética de la estructura. Ejemplos de métodos que gozan de esta ventaja son: implantación de barras encoladas, colocación de láminas FRP, etc.
Superior	
	La ubicación de un refuerzo en la cara superior del forjado, también supone la posibilidad de conservar elementos de carácter valioso por su estética. En este caso, hay que tener muy en cuenta que el refuerzo suele aumentar el peso del forjado, imponiendo un aumento de cargas. Esto puede acelerar el desgaste de los elementos sobre los que se distribuyen las nuevas cargas. Algunos ejemplos son: sistema mixto madera-hormigón, colocación de perfiles de acero o FRP.
Lateral	
	La rapidez de ejecución es la ventaja más significativa de situar lateralmente los refuerzos. En comparación con las anteriores maneras de reforzar, la operación para su colocación es directa y relativamente sencilla, evitando hacer huecos en los elementos, y/o levantar piezas para su ubicación. Pero en detrimento, exceptuando la posibilidad de colocar un falso techo, son refuerzos que se ven a simple vista. Como ejemplo tenemos la colocación de perfiles o chapas de acero, o el refuerzo con piezas de madera.
Inferior	
	La ubicación por la parte inferior del refuerzo, evita el problema de aumento de cargas, por peso propio del refuerzo. También son arreglos que suponen un impacto visual. Además esta colocación, implica una disminución en la altura libre de la estancia. Refuerzos de este tipo pueden ser: colocación de piezas de madera o refuerzos con perfiles, sistema "NOU/BAU" o el atirantado.

Figura 7. Clasificación de los refuerzos según ubicación.

	Interior	Superior	Lateral	Inferior
Apeos				X
Parteluces - Jabalcones				X
Sistemas con aporte de madera				
▪ Duplicación de viguetas			X	X
▪ Prótesis	X			
▪ Piezas que abarcan la longitud del elemento			X	X
Acero				
▪ Perfiles/pletinas	X	X	X	X
▪ Atirantado metálico				X
Resina epoxi				
▪ Bandas FRP	X	X	X	X
▪ Perfiles FRP		X	X	X
▪ Placas/Barras de refuerzo interno	X			
Madera-hormigón		X		

En el momento de plantearse el refuerzo/consolidación, hay que tener muy en cuenta la combinación de materiales, por ello hay que prestar atención a la incompatibilidad entre ellos.

Es vital que todos los elementos que intervienen en los refuerzos, posean los tratamientos superficiales necesarios para evitar las corrosiones prematuras o la aparición de fisuras que debiliten las vinculaciones.

En cuanto a los sistemas de refuerzos presentados, los que tienen una mejor vinculación son los métodos realizados con FRP y los que se obtienen con uso de resinas epoxi. Estos materiales presentan menos problemas de adherencia, y sus módulos de elasticidad son muy compatibles con la madera.

En la unión madera-hormigón el enlace depende en gran medida de los conectores. Una mala ejecución de las soleras de hormigón, podría derivar en la aparición del fenómeno de la carbonatación. Éste afectaría a las conexiones a través de la corrosión, debilitando la vinculación entre madera y hormigón. Además si el hormigón no trabaja solidariamente con la madera se convierte en una carga, y si se pretendía, con esta solución, restablecer la resistencia del forjado obtenemos justamente lo contrario, el problema se agrava.

Las prótesis realizadas con unión madera-madera deben ser extremadamente cuidadas, evitando mezclar maderas de distinto tipo, ya que por sus composiciones internas no presentan las mismas propiedades de resistencia, elasticidad, absorción de humedad, etc. Esto complica la combinación de ciertas maderas para que puedan trabajar conjuntamente en determinadas circunstancias.

En los refuerzos madera-metal, el metal es un material que a pesar de proporcionar grandes ventajas en el ámbito de resistencia, si no presenta el tratamiento superficial adecuado al ambiente donde están instalados, la corrosión puede producirle grandes daños en un escaso período de tiempo. Las maderas que tienen taninos resultan muy negativas para el metal, pudiendo incluso deshacer por completo un elemento realizado con este material. En estos casos, se aconseja la utilización de herrajes y clavos con algún tipo de protección electrolítica. Otra solución adecuada sería el uso de acero inoxidable, ya que éste presenta gran resistencia ante situaciones adversas (tiene un buen comportamiento tanto en ambientes alcalinos como ácidos).

La rapidez o la facilidad constructiva que pueda proporcionar un refuerzo respecto a otro, es un parámetro decisivo para decantarse por un método de refuerzo en concreto.

Los refuerzos con perfiles metálicos, presentan la dificultad de un fácil manejo. Su elevado peso en ocasiones requiere de maquinaria específica para poder ubicarlos en la zona a reforzar. Frente a este problema, ha nacido una fuerte competencia como es el uso de perfiles elaborados con FRP. Este nuevo material mucho más ligero proporciona una mayor manejabilidad en obra, siendo posible su colocación a través de simples operarios sin la necesidad de medios auxiliares que puedan encarecer el proceso.

Por otro lado, la posibilidad de acometer soluciones, donde la instalación se produzca por medio de piezas pequeñas, como es el caso del sistema de refuerzo "NOU/BAU", evita la necesidad de emplear métodos con piezas de dimensiones elevadas, ejemplo refuerzo de viga con pieza de madera en toda su longitud.

Esto en obras de rehabilitación es muy interesante, ya que las medidas del local donde se realiza la intervención pueden complicar la colocación de refuerzos de piezas muy grandes, ya sea por las dimensiones que se presentan para el acceso al lugar de trabajo o por las dimensiones de la zona a reforzar.

Cuando se plantea un refuerzo o consolidación es por causa del deterioro de la estructura existente. La relación entre el daño producido y el tipo de sistema a ejecutar es otro de los parámetros a estudiar para una correcta elección del método.

Los forjados de madera pueden ver afectada su capacidad portante, resultando ésta insuficiente, por causas como un cambio de uso de la estructura o por un incremento de las sobrecargas de uso. En estos casos el daño afecta al conjunto del forjado, por lo que lo más eficaz sería aplicar sistemas que consoliden toda la zona afectada, es decir, emplear como solución un refuerzo global. Además si valoramos el aspecto económico, tendría especial relevancia el uso de métodos que permitan conseguir, de forma rápida y con mínimo material, una buena repartición de cargas. Así, tenemos soluciones como: duplicidad de viguetas, sistema mixto madera-hormigón, disposición de jabalcones o los parteluces. La colocación de estos métodos permite absorber el nuevo incremento de cargas, ya que la estructura existente no estaba preparada para asumir tales modificaciones.

Plantear un aporte de madera o reforzar mediante sistemas metal-madera de forma individual cada elemento estructural que conforma el forjado, también permite solventar el problema del incremento de cargas. Pero esto encarecería la intervención, puesto

que la cantidad de material necesaria es mucho más elevada que en los métodos anteriormente señalados.

La presencia de agua en las estructuras de madera es el foco de muchos de los daños que se producen en las mismas. Los agentes bióticos necesitan de humedad para desarrollarse y dar comienzo a la degradación de la madera, por ser su fuente de alimento. De esta forma, los causantes de daños como la pérdida de densidad y resistencia en las piezas estructurales son los hongos de pudrición y los insectos de ciclo larvario.

Para decantarse por el sistema de refuerzo, en estos casos, lo principal es valorar el alcance del daño. Partiendo de este paso, si la degradación está localizada en una zona concreta lo mejor es aplicar un refuerzo puntual, como puede ser solventar problemas en cabezas de viga. En cambio, si el daño ya se extendió por todo el elemento o ante la duda del alcance real del problema (dificultades en la inspección), lo más adecuado es aplicar medidas globales en el elemento a reforzar.

Por otro lado, si tras realizar tratamientos químicos previos a establecer un sistema de refuerzo/consolidación, se consigue tener la certeza de la exterminación de la causa del problema, no sería un inconveniente poder colocar refuerzos de madera. Pero si el foco que causa la degradación aun estuviera activo, o hubiese la posibilidad de que con el tiempo volviera a establecerse, lo responsable sería evitar el uso de madera y centrarse en elaborar sistemas de refuerzo a través de metal (debidamente tratado ante la posibilidad de la presencia de agua). También se podrían usar resinas epoxis que son muy resistentes ante las agresiones de agentes bióticos.

Para emplear sistemas mixtos de madera-hormigón en estructuras donde se ha perdido parte de la resistencia mecánica de la madera, habría que considerar si la madera afectada, sería suficientemente capaz de colaborar conjuntamente con el hormigón en su estado de degradación.

Figura 8. Relación entre el daño producido y el tipo de sistema a ejecutar.

Causa del daño	Perjuicio	Sistemas más favorables
Cambio de uso	Capacidad portante insuficiente Excesivas deformaciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Duplicidad de viguetas ▪ Sistema mixto madera-hormigón ▪ Disposición de jabalcones ▪ Parteluces ▪ Atirantado metálico ▪ Refuerzos con perfiles o placas de metal. ▪ Refuerzos con perfiles FRP.
Incremento de sobrecargas de uso		
Hongos xilófagos (pudrición parda, blanda, blanca)	Pérdida de densidad y resistencia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prótesis con resina epoxi. ▪ Refuerzos con perfiles o placas de metal. ▪ Refuerzos con perfiles FRP. ▪ Atirantado metálico.
Insectos de ciclo larvario		

El fuego es un factor muy importante a valorar en cualquier intervención. Las consecuencias que éste produce en las estructuras pueden ser tan graves, llegando al punto de colapsarlas. Por ello es importante elegir correctamente el material de los elementos del refuerzo, ya que no todos se comportan de la misma manera frente a este fenómeno destructor.

Como ya se vino mencionando en el apartado patologías de origen abiótico la madera es un material que presenta una gran resistencia al fuego, gracias a generar una capa carbonizada que aísla la parte interna de la pieza, manteniéndola intacta, conservando las propiedades físicas y mecánicas. La pérdida de capacidad portante se produce lentamente, a medida que se va reduciendo la sección de la pieza como consecuencia del tiempo de exposición al fuego. Esto permite salvar a la estructura de un colapso inmediato.

Los metales, al contrario que la madera, son considerados como materiales incombustibles. Esta característica puede crear una falsa sensación de seguridad, ya que el aumento de la temperatura en ellos supone importantísimas pérdidas en su capacidad mecánica.

Las altas temperaturas que llegan a alcanzarse en un incendio provocan deformaciones en los elementos metálicos, las cuales no revierten a su estado original tras el cese del fuego. Estas alteraciones perjudican la estabilidad de los sistemas de refuerzo planteados mediante unión madera-metal.

En cambio el hormigón, dadas las características de su composición, lo convierten en un material que proporciona una buena resistencia al fuego. Generalmente no sufre colapsos ante un incendio. Y a pesar de posibles deformaciones, la mayor parte de las estructuras suelen ser, después de haber sufrido la acción del fuego, lo suficientemente seguras como para restablecer sus funciones normales.

El hormigón es un material que resiste bien el aumento de las temperaturas, no arde, no aumenta la carga del fuego y detiene la propagación del mismo. Además, tampoco produce humo ni gases tóxicos.

Cuando se utiliza este material es importante tener en cuenta el espesor, ya que el fuego introduce altos gradientes de temperatura y como consecuencia, las capas calientes de la superficie tienden a separarse y descascararse de la parte interior que está más fría; lo cual fomenta la formación de grietas. Esto en estructuras hechas totalmente de hormigón es un problema menor porque se trabaja con espesores gruesos, pero en los sistemas de consolidación mixtos madera-hormigón al tener espesores pequeños constituye un gran hándicap.

Sobre las resinas epoxi y su comportamiento frente al fuego, es difícil cuantificar su resistencia, ya que ésta depende del tipo de resina epoxi utilizada. Pero de manera genérica se puede decir que estas resinas no presentan un buen comportamiento ante el fuego.

El fuego es un gran problema cuando se habla de materiales FRP, éstos presentan una importante pérdida de resistencia frente al fuego, lo que afecta a la estabilidad y durabilidad de los refuerzos elaborados con dichos materiales.

Tras ver la incidencia del fuego sobre este tipo de materiales se puede concluir que:

- Los refuerzos constituidos con materiales FRP, adhesivos y los sistemas mixtos madera-metal son los que presentan una mayor inestabilidad frente al fuego. La capacidad portante en estos casos se ve altamente afectada, produciendo graves daños en las estructuras.

- Los refuerzos de madera-madera a pesar de tener un mayor grado de resistencia al fuego que los dos anteriores, la disminución en su capacidad portante por una disminución en la sección de las piezas, puede hacer que la estructura ya no sea apta para resistir las cargas a las que estaba sometida, perdiendo su valor estructural.
- Los refuerzos madera-hormigón son los que ofrecen el mejor comportamiento al fuego, la pérdida de resistencia mecánica es relativamente pequeña.

Finalmente, es interesante valorar los posibles sistemas de refuerzo y/o consolidación, en cuanto a las ventajas e inconvenientes que suscita su puesta en obra.

Para la disposición de elementos reforzantes, es necesario realizar aperturas de huecos, fijaciones, colocación de apeos, construcción de encofrados, etc.

El uso de elementos de madera, metal o FRP en un refuerzo/consolidación, no requieren de la colocación previa de un encofrado. Pero en cambio, sí precisan en la mayoría de las ocasiones del uso de apeos que sostengan la estructura dañada mientras se realizan las operaciones de refuerzo. Otra gran ventaja que aportan estos métodos, es la inmediata respuesta que ofrecen a la absorción de cargas, una vez estén completamente instalados con todas sus fijaciones.

En contraposición, los sistemas realizados con materiales del tipo resina epoxi o hormigón, sí que precisan de un tiempo de curado, donde van adquiriendo poco a poco las resistencias necesarias que ayudarán a soportar las cargas de la estructura. Además, el empleo de resinas epoxi para la realización de refuerzos, en ocasiones, requiere de la elaboración de encofrados, que sirvan de molde para darle al refuerzo la forma adecuada. Los sistemas mixtos madera-hormigón carecen de la necesidad del encofrado, ya que será los propios tablones del piso de madera y las paredes de la estancia, las que hagan la función de molde, conteniendo la masa hormigonada mientras se produce la acción de curado.

En cuanto a la diferencia que supone la mano de obra entre unos sistemas y otros, se podría considerar que ésta es ínfima. Si es verdad, que el manejo con adhesivos requiere de personal especializado, pero la colocación de un perfil metálico o una viga de gran sección requieren de un mayor número de trabajadores. En cuanto a esto se deduce que las necesidades, en cuanto a la mano de obra, que cada sistema precisa se compensan. Por lo tanto no hay ningún método de los expuestos que presente mayor ventaja ante este aspecto.

CASO PRÁCTICO

Pazo de “El Rosal”



ÍNDICE

Introducción	94
Antecedentes	96
Evaluación de daños	108
Propuesta de intervención	112
Caso 1: Intervención en cabezas de viga.	112
Caso 2: Intervención en vigas del entramado horizontal.	118
Caso 3: Intervención en estructura de cubierta, cerchas.	125

INTRODUCCIÓN

Tras elaborar un estudio sobre los forjados de madera, haciendo un recorrido por los posibles ataques que afectan y deterioran la madera, conocer las técnicas de inspección más habituales, las cuales permiten realizar diagnósticos sobre el alcance de los daños, y plantear diferentes sistemas de consolidación y/o refuerzo en estructuras de madera, se presenta, a continuación, un caso práctico con el que se pretende poner de manifiesto los conocimientos adquiridos en los fundamentos teóricos.

Para ello, a través de la visita al Pazo se realizará el estudio del estado actual, se evaluará el alcance de los daños que presentan las estructuras. Se determinarán cuáles son las posibles causas de los daños detectados. Y por último, se establecerá una propuesta de intervención, en la que se recogerán varios de los sistemas de consolidación y/o refuerzo estudiados con anterioridad.

ANTECEDENTES

▪ SITUACIÓN

El Pazo del Rosal se sitúa en la localidad costera de Moaña, dentro de la provincia de Pontevedra (Galicia). Dicho pazo se ubica, más concretamente, en la zona de "El Rosal", asentado sobre una colina de 54 metros, desde la cual se puede divisar todo el entorno.



*Ilustración 1. Vista aérea zona de "El Rosal" - Parcela Pazo.
Fuente:*

▪ DESCRIPCIÓN

El origen del pazo se sitúa aproximadamente en el siglo XV. Su datación es orientativa, ya que no existe documentación donde se acredite la fecha exacta de construcción.



Ilustración 2. Pazo de "El Rosal". Fuente: Propia

La característica más destacada de dicha edificación es el proceso evolutivo sufrido en su construcción. En los muros de las fachadas se observan con claridad las cicatrices de las distintas etapas constructivas.

Tras todos los procesos de ampliación y reforma que han tenido lugar en este edificio, actualmente éste presenta una forma cuadrangular. Y consta de dos plantas y de una cubierta a cuatro aguas.

El edificio presenta una estructura de muros de carga, serán éstos los que impongan la división entre las estancias en las dos plantas que constituyen el pazo. El espesor es de

0,65 metros y la construcción de los muros es de dos tipos, debido a las reformas sufridas a lo largo de su construcción. Por un lado tenemos muros realizados a partir de grandes mampuestos tomados con mortero de barro y asentados con la ayuda de pequeños ripios, y por otra parte se elaboran muros mediante la colocación de sillares. En cuanto a las plantas decir que la superior era la destinada a albergar a los dueños de la propiedad. En ella se ubicaba la cocina, un salón, el dormitorio principal, una galería y otras estancias de las cuales se desconoce su uso. Por otra parte la planta inferior era la destinada a los miembros del servicio y los animales.

La separación entre plantas se hizo a través de forjados de madera: viga-vigueta-entablado. Y el forjado de cubierta se compone por cerchas de madera, que sostienen las correas y la teja que recubre toda la edificación.

- FACHADAS



Fachada Norte



Fachada Sur



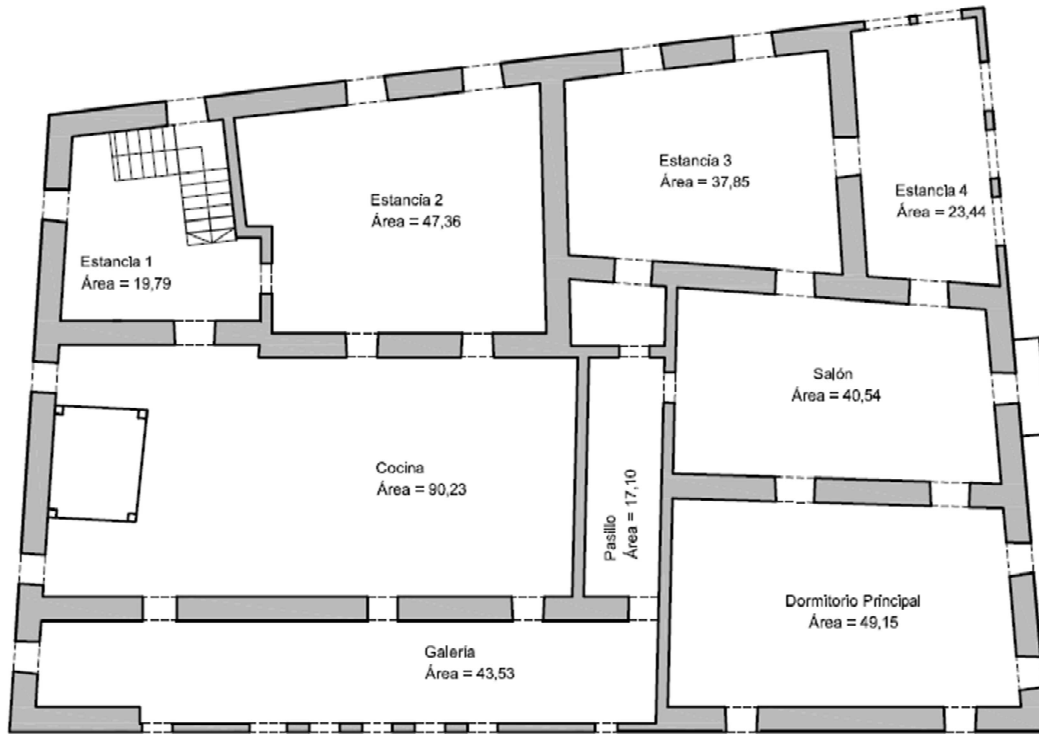
Fachada Oeste



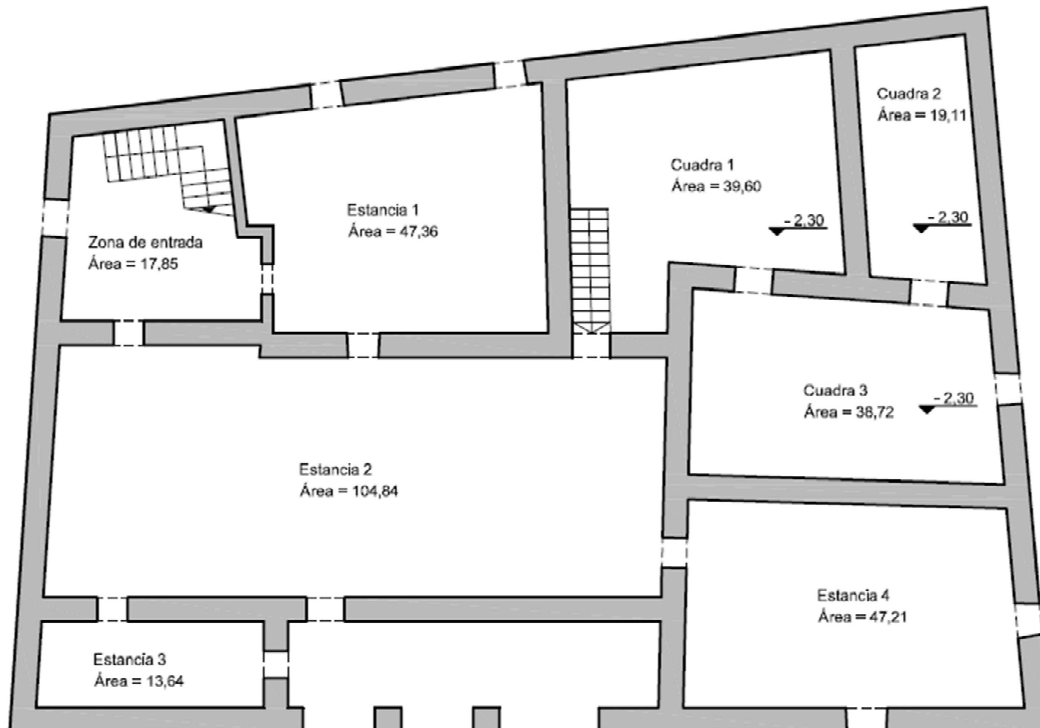
Fachada Este

■ PLANTAS ESTADO ACTUAL

PLANTA PRIMERA



PLANTA BAJA



PLANOS

- Arquitectura

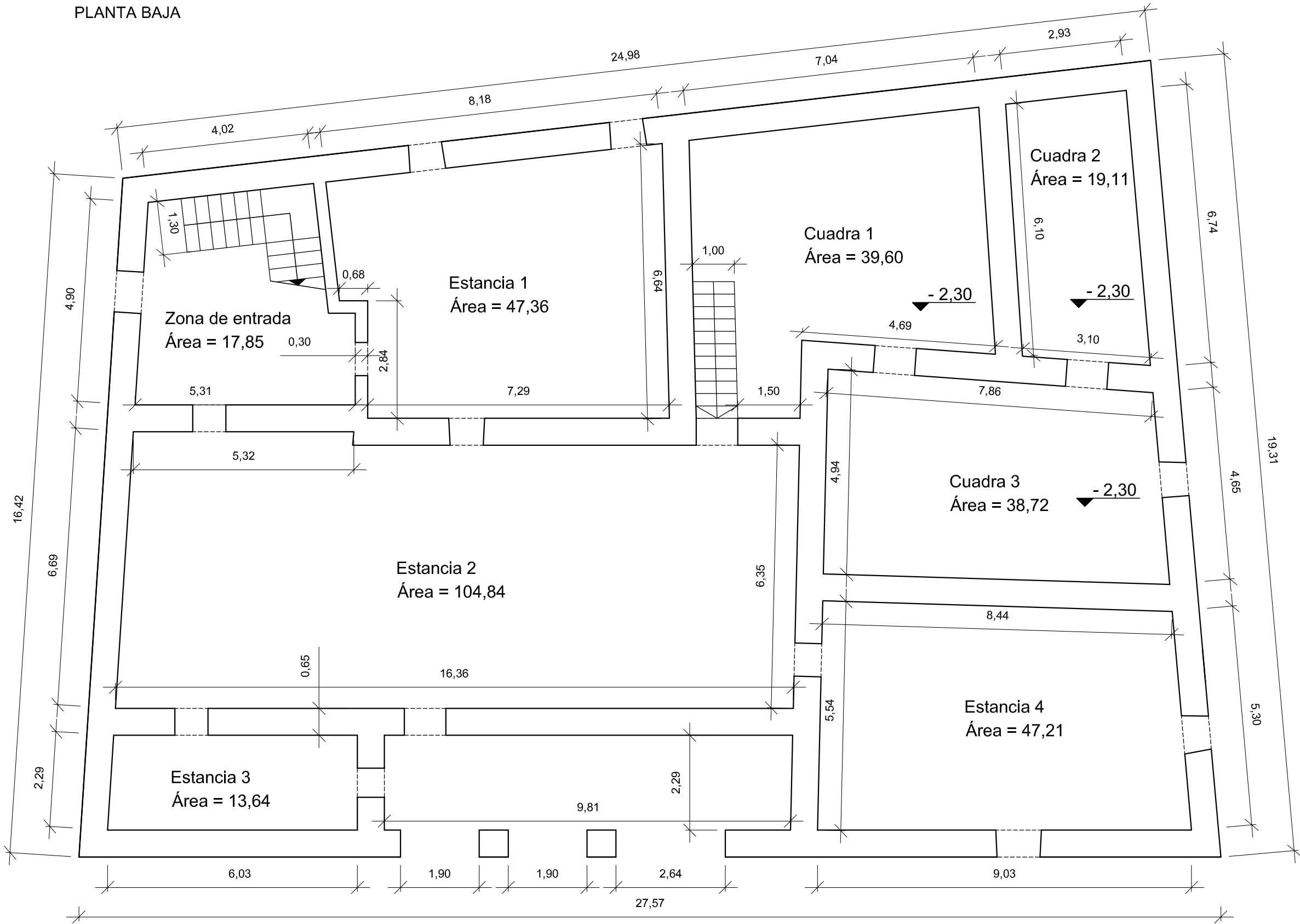
- A 01 Planta baja distribución cotas
- A 02 Planta primera distribución cotas
- A 03 Cubierta

- Estructura

- E 01 Entramado horizontal planta baja
- E 02 Cordón inferior cerchas
- E 03 Cordón superior cerchas-correas
- E 04 Cerchas axonometría y alzados



PLANTA BAJA



ARQUITECTURA

Nº PLANO A 01

PLANO
Planta baja distribución cotas

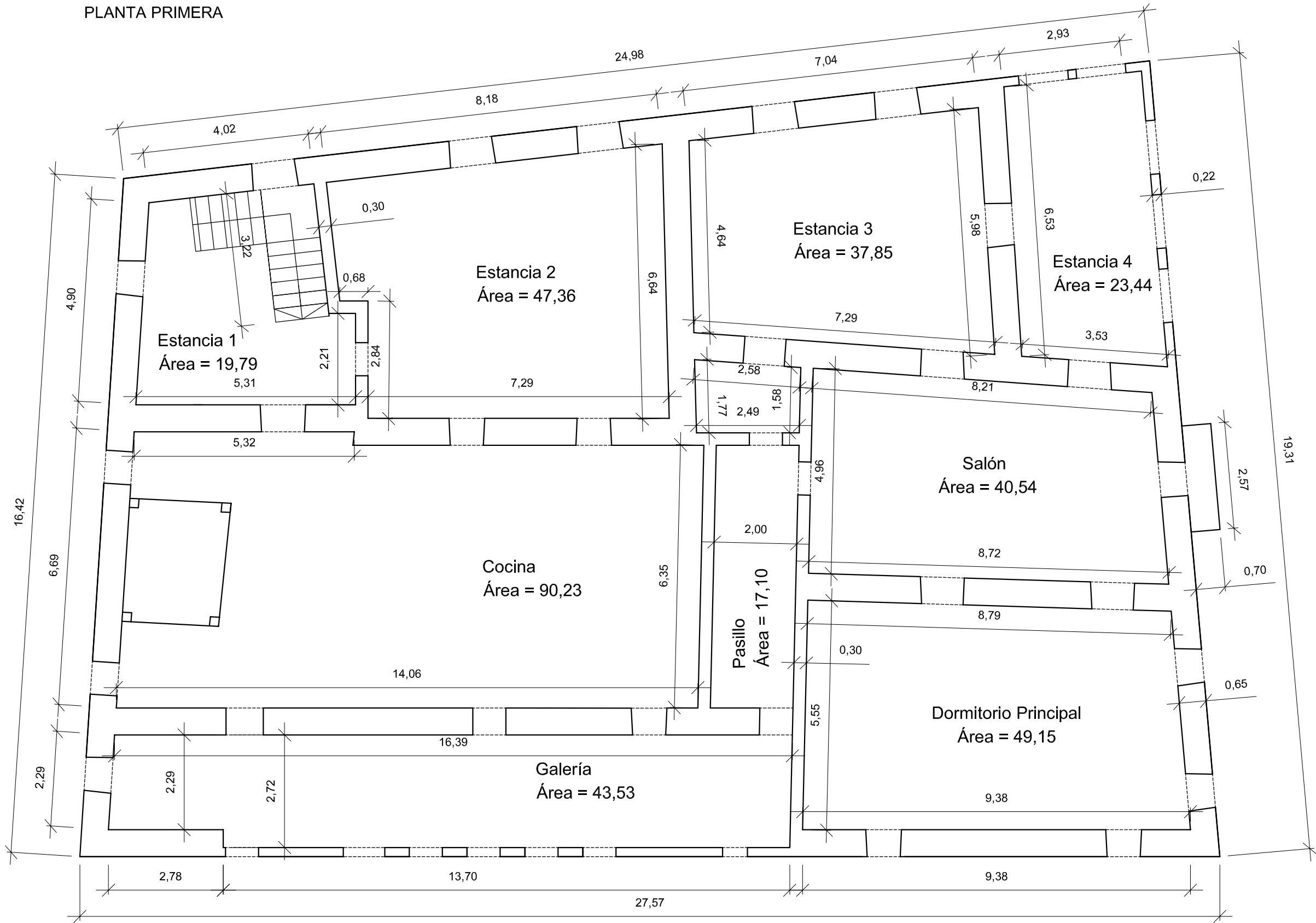
ESTADO Actual COTAS M ESCALA 1:100

AUTORA
Gayo Calo, Laura

FIRMA



PLANTA PRIMERA



ARQUITECTURA

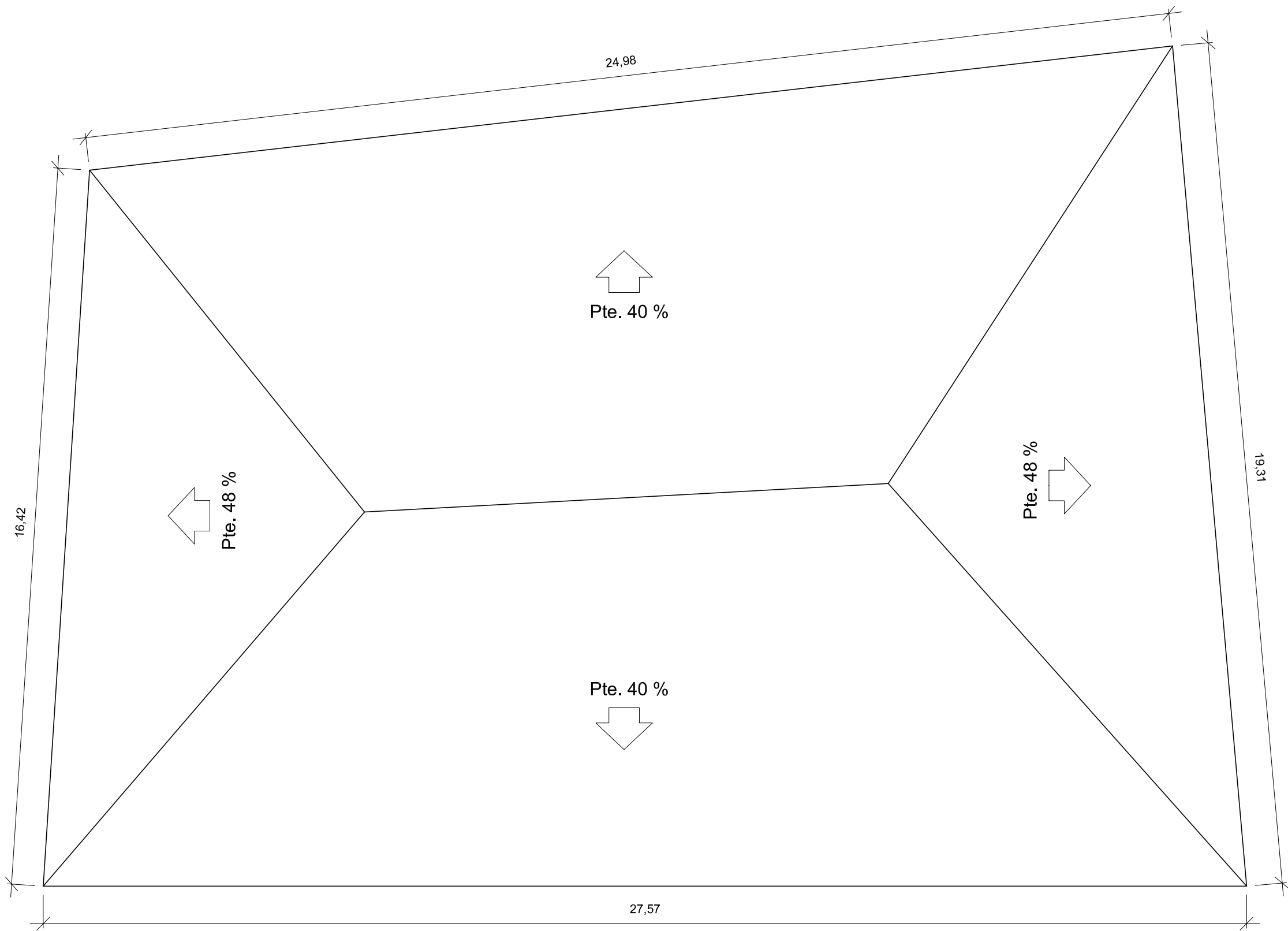
Nº PLANO A 02

PLANO
Planta primera distribución cotas

ESTADO Actual COTAS M ESCALA 1:100

AUTORA
Gayo Calo, Laura

FIRMA



ARQUITECTURA

Nº PLANO A 03

PLANO Cubierta

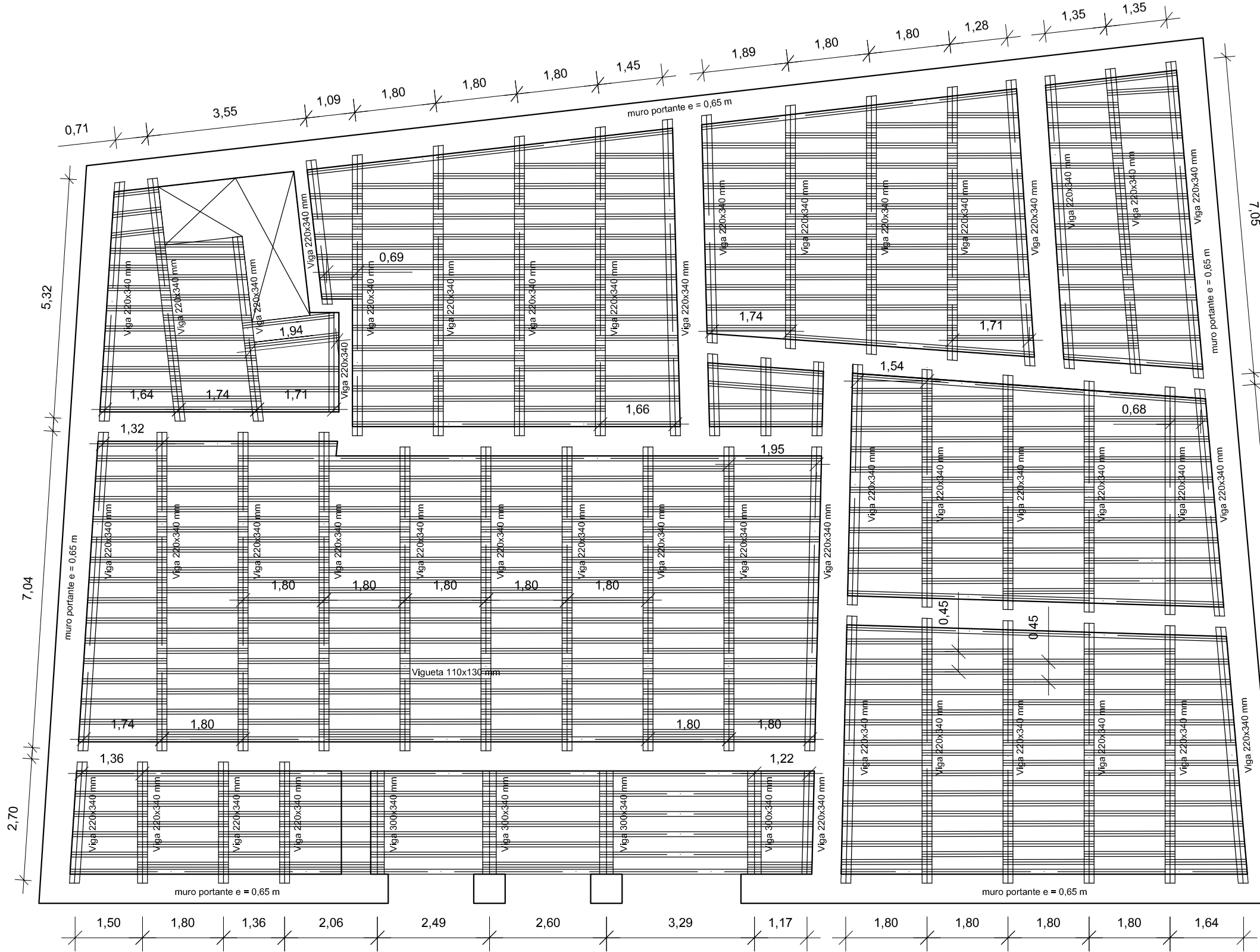
ESTADO Actual

COTAS M

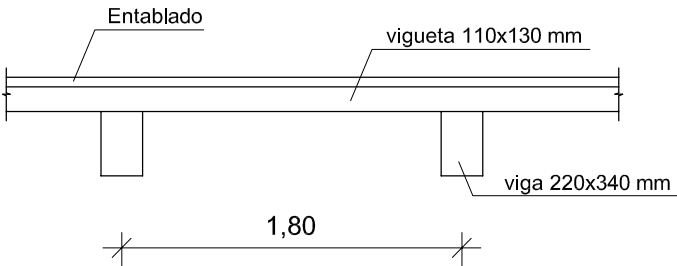
ESCALA 1:100

AUTORA Gayo Calo, Laura

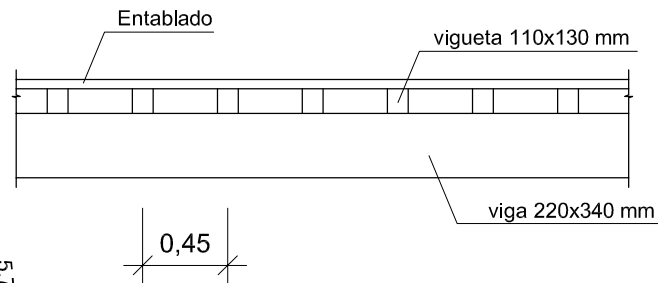
FIRMA



Sección transversal por las vigas Escala 1:40



Sección transversal por las viguetas Escala 1:40



ESTRUCTURA

Nº PLANO E 01

PLANO
Planta baja entramado horizontal

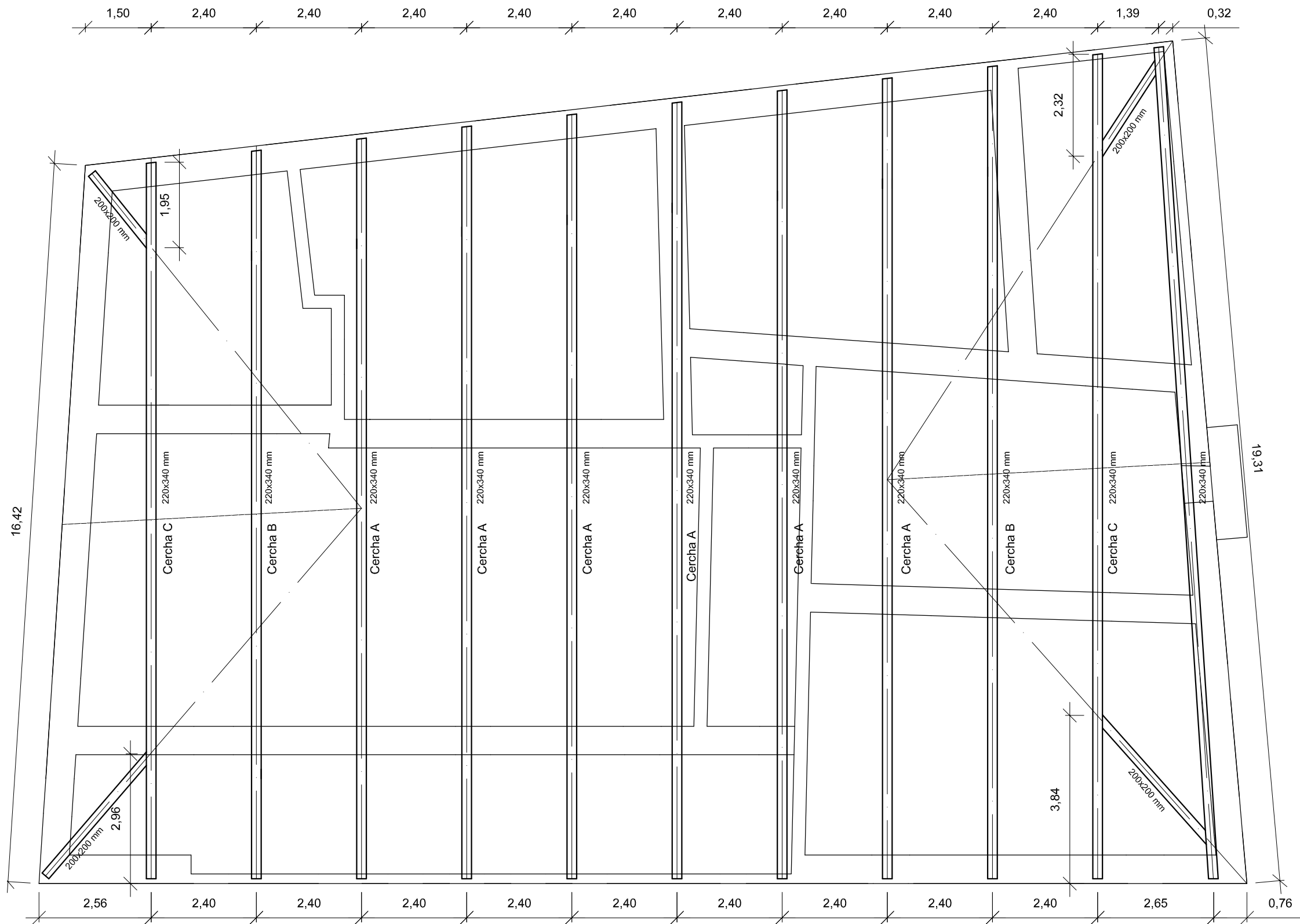
ESTADO
Actual

COTAS
M

ESCALA
1:100

AUTORA
Gayo Calo, Laura

FIRMA



ESTRUCTURA

Nº PLANO E 02

PLANO Cubierta - Cordón inferior cerchas

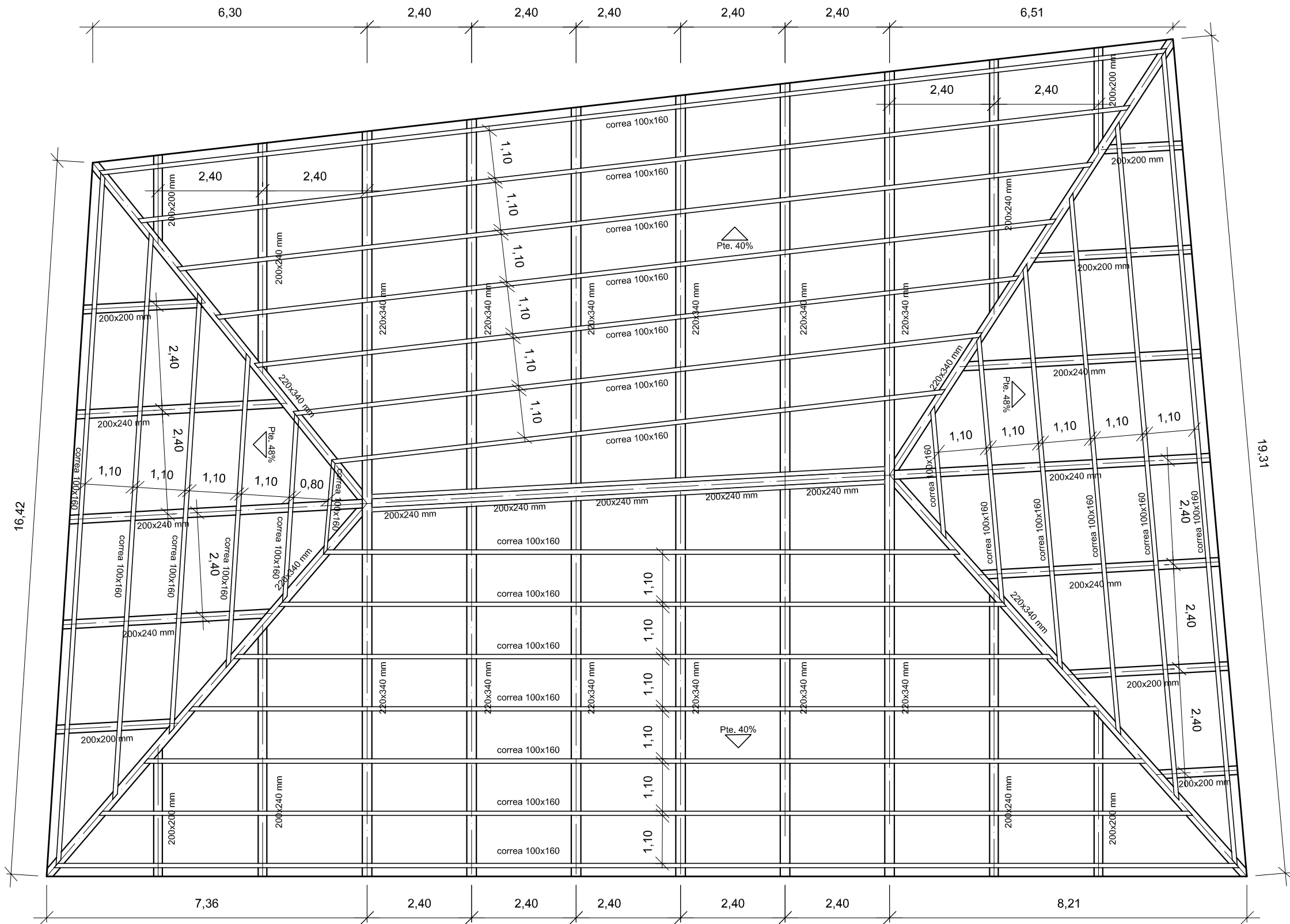
ESTADO Actual

COTAS M

ESCALA 1:100

AUTORA Gayo Calo, Laura

FIRMA



ESTRUCTURA

Nº PLANO E 03

PLANO

Cubierta - Cordón superior cerchas - Correas

ESTADO

Actual

COTAS

M

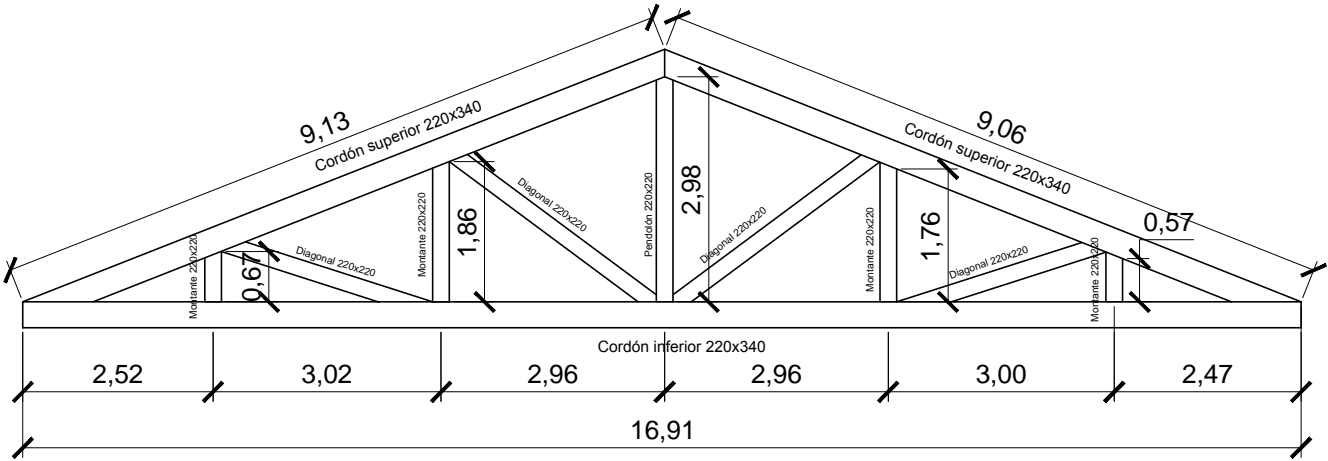
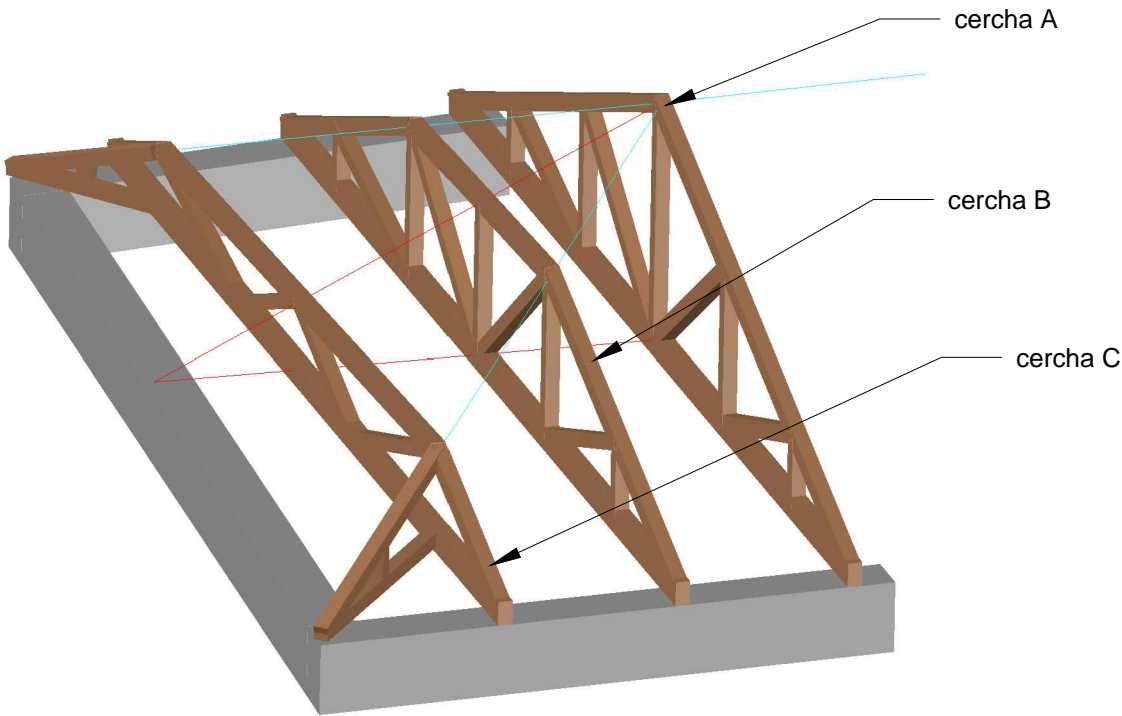
ESCALA

1:100

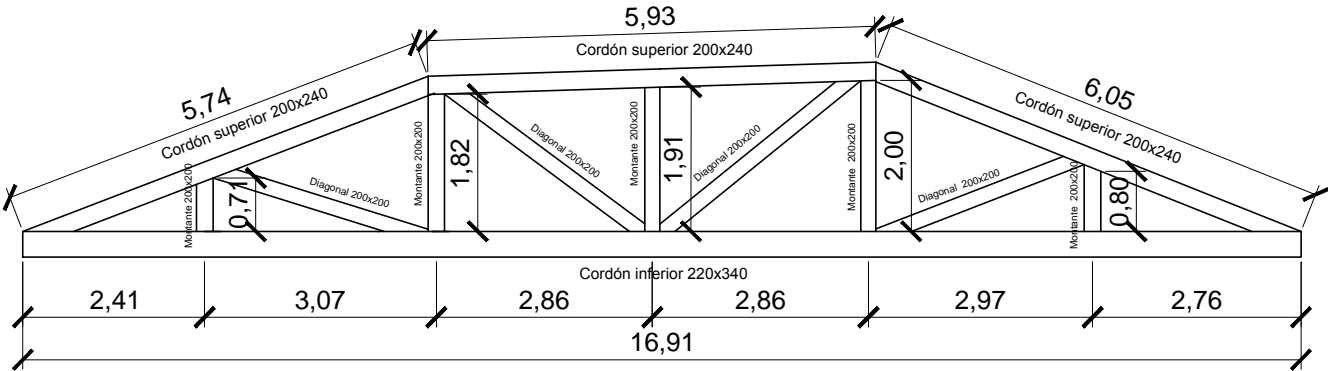
AUTORA

Gayo Calo, Laura

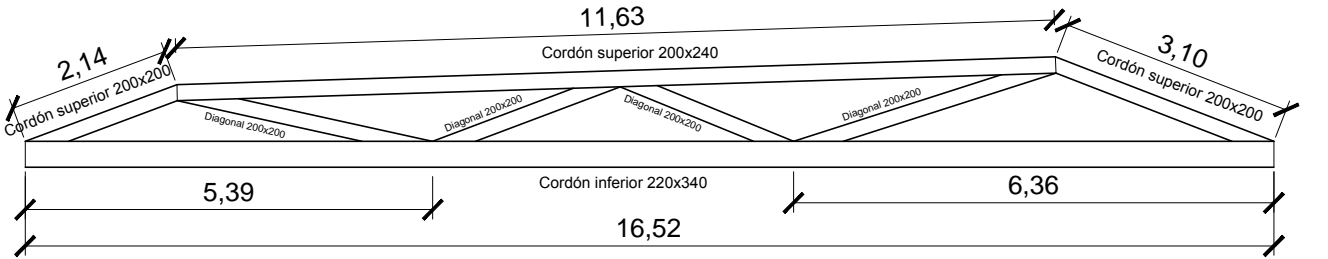
FIRMA



Cercha A



Cercha B



Cercha C

ESTRUCTURA

Nº PLANO E 04

PLANO Cerchas axonometría - alzados

ESTADO Actual COTAS M ESCALA 1:100

AUTORA Gayo Calo, Laura

FIRMA

EVALUACIÓN DE DAÑOS

La inspección se ha desarrollado en el interior del edificio. Por razones de accesibilidad y seguridad, no se ha podido entrar en todas las estancias, lo cual ha dificultado la valoración del alcance de los daños en ciertas zonas. Pero en aquellas zonas accesibles, se ha podido tomar datos del estado de conservación de la madera.

Tras analizar el aspecto que presentan las piezas de madera, se busca identificar el agente causante de los daños, su localización en el edificio y su extensión haciendo una valoración de la gravedad del daño según la profundidad del ataque.

A continuación se describe en detalle el resultado de la inspección. Haciendo referencia a los puntos inspeccionados y a su localización en el edificio (ver plano adjunto D 01), así como una descripción más extensa de los agentes causantes de los daños.

- Identificación y localización de daños.

Se puede apreciar a simple vista que la madera se encuentra afectada por una degradación intensa, principalmente en las zonas de la estructura adyacentes a los muros de fachada. Las piezas, muestran cambios en la coloración de la madera y una sensible pérdida de sección en algunas zonas. La causa principal de estos daños, es el alto contenido de humedad que se ha detectado, favoreciendo la aparición y el desarrollo de hongos xilófagos. No hay muestra de ataques por insectos de ciclo larvario, lo que permite deducir que las maderas encontradas son resistentes a estos ataques, puesto que es un agente biótico que se ha encontrado en otras edificaciones situadas en los alrededores. Así, se puede señalar la posibilidad de estar tratando con maderas de roble o castaño, inclinándose la balanza hacia el castaño, ya que es un árbol típico de la zona.

En las zonas centrales del entramado horizontal, que separan la planta baja y la planta primera, y en algunas de las cerchas que componen la cubierta de la edificación, se observaron pequeñas fendas en ciertas piezas.

También se han localizado deformaciones excesivas en un elevado número de elementos estructurales.

La cubierta no presenta ningún problema estructural, sólo se ha detectado en una pieza concreta de una cercha una rotura, la causa se relaciona con la existencia de un nudo que provocó el colapso del elemento.

- Estimación de la gravedad de los daños.

Los daños más graves son los ocasionados por la acción de los hongos xilófagos y las deformaciones excesivas que presentan algunos de los elementos del forjado. Hay puntos en el entramado horizontal y en la estructura de cubierta, donde el daño es muy grave con pérdida de sección, como es el caso de las cabezas de vigas y de las intersecciones entre el cordón superior e inferior de las cerchas.

Los daños que se producen en las piezas de madera tienen como consecuencia la pérdida de resistencia mecánica del elemento o elementos afectados, que incapaces de absorber las acciones a las que estaban sometidas, provocan una nueva distribución de cargas. Los elementos sanos son los encargados por solidaridad, de captar esas cargas.

Se produce así una sobrecarga en las piezas no dañadas acelerando el proceso de colapso de la estructura.

- Estabilidad de los muros.

Aunque no es objeto de este estudio determinar con detalle la estabilidad de los muros de carga, la inspección realizada permite afirmar que los muros de carga, tanto los perimetrales como los interiores, se encuentran en una situación estable. El estado de estos muros, por tanto, se considera válido. Solo se requiere mantener especial cuidado con las medidas que se vayan a realizar, para evitar que las intervenciones no debiliten en ningún momento la estabilidad de los muros.

- Resumen y conclusiones

Los principales daños y de carácter grave, existentes en los elementos de madera adyacentes a los muros de fachada son de origen biótico, debidos a hongos xilófagos, llegando a destruir prácticamente la sección de la pieza. Las zonas más afectadas son las cabezas de las vigas.

Las deformaciones excesivas que presentan algunos de los elementos de los forjados suponen el incumplimiento de los requisitos en cuanto a seguridad estructural.

En la cubierta se ha producido la rotura de un elemento de una cercha a causa de la existencia de un nudo.

También se han localizado fendas de secado en las piezas de madera, pero éstas no ocasionan ningún tipo de problema estructural.

En los muros de fachada, por ser zonas afectadas por las inclemencias de los agentes atmosféricos, se han detectado mayores daños. La gran presencia de humedad es la causa principal de los problemas detectados. Por lo que la primera medida a plantear sería la eliminación de la fuente de humedad a través de muros y/o cubierta.

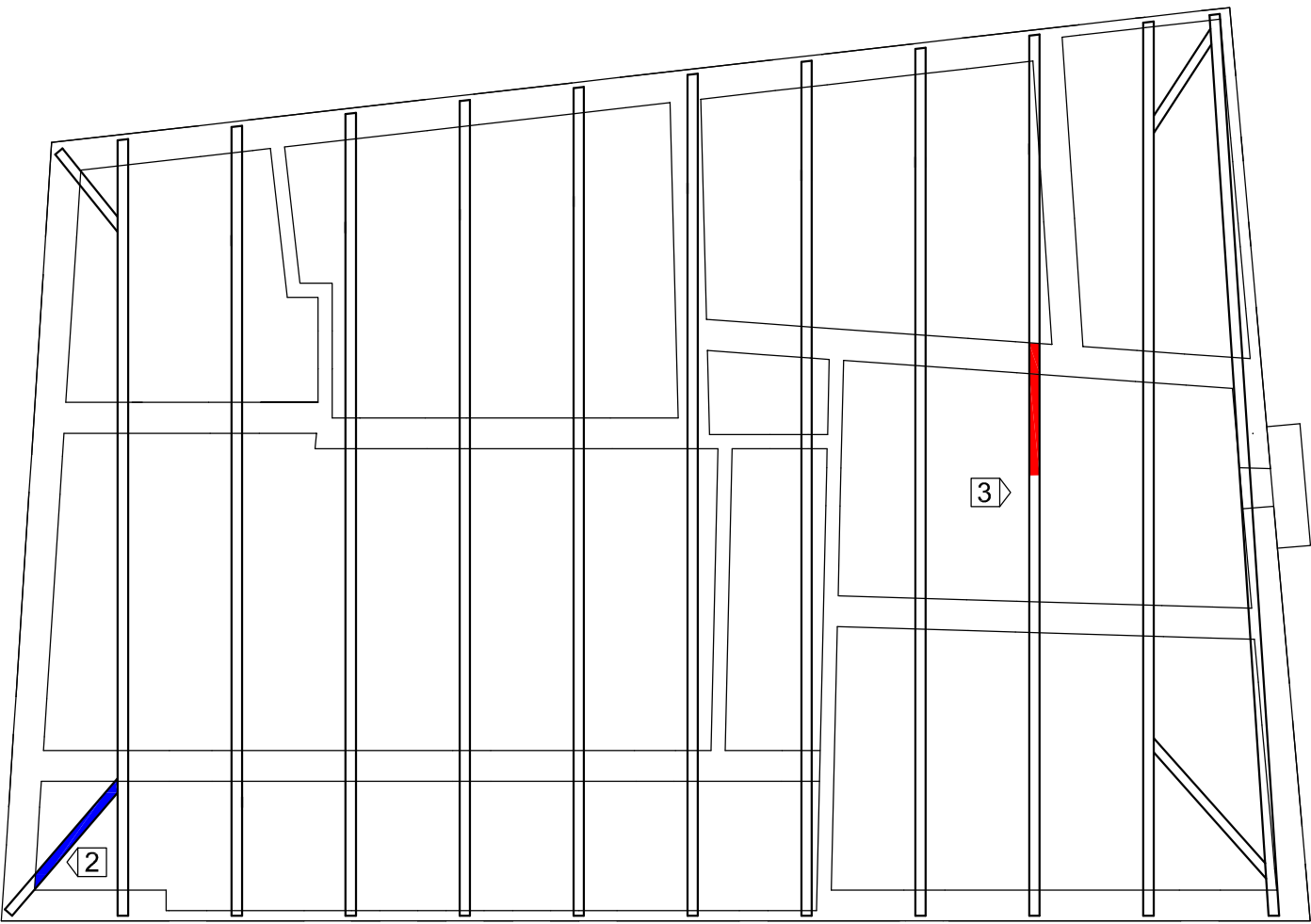
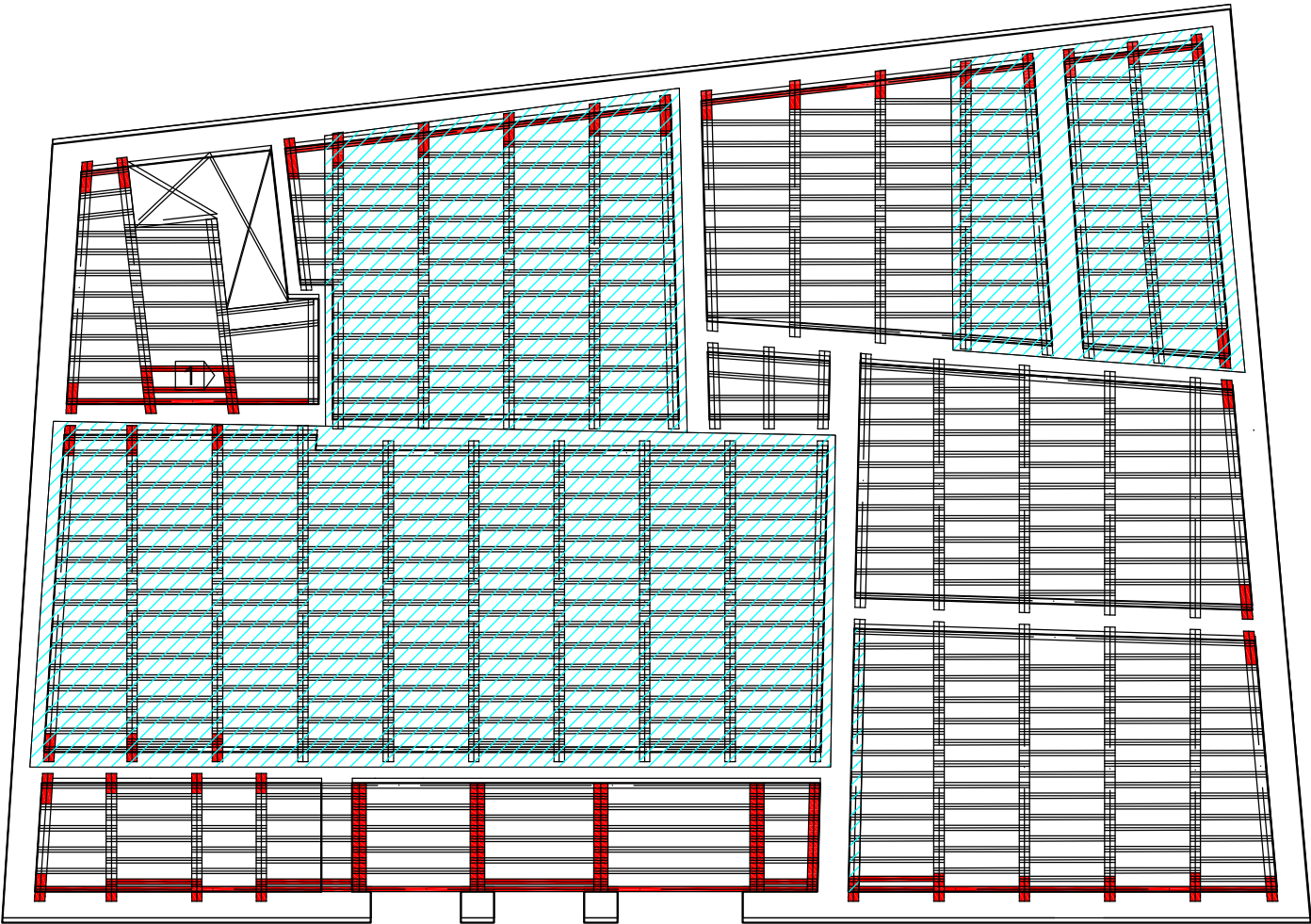
En las zonas interiores, la madera presenta bastante buen estado, los daños son mínimos presentando alteraciones prácticamente superficiales, como es el caso de ciertas fendas que no afectan a la capacidad portante de la estructura.

El estado de los muros es bueno, por lo que no supone ningún problema en cuanto a la estabilidad de la estructura.

PLANOS

- Evaluación de daños

D 01 Estudio patológico



- Tramo de viga en buen estado
- Pudrición por hongos xilófagos
- Deformación excesiva
- Rotura parcial del elemento



PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

- Presentación de medidas de actuación.

A continuación se realizará una comparativa entre dos posibles sistemas de consolidación, para cada uno de los tres casos de intervención:

1. Consolidación en cabezas de viga.
2. Consolidación en vigas de forjado.
3. Consolidación de cerchas.

En cada caso se explicarán los pasos para la ejecución del método, se realiza la medición y el presupuesto, y por último se comparan los sistemas escogidos.

Caso 1: Intervención en cabezas de viga.

La edificación sometida a estudio, presenta de manera generalizada un deterioro importante en las cabezas de las vigas que se encuentran empotradas en los muros de carga. A continuación se presentan dos métodos de intervención ante esta problemática.

- **Alternativa 1:** Consolidación a través de perfil en U. (Plano I 01)

Proceso de ejecución

1. Colocación de apeo, compuesto por puntales metálicos; sopandas y durmientes de madera.
2. Levantamiento del entablado adosado a la zona próxima a la cabeza de viga.
3. Se retiran las viguetas dañadas.
4. Se sana la viga, haciendo un corte dentado por la zona sana.
5. Se limpia el hueco dejado por la pieza y se realiza una base con mortero de nivelación para la colocación del perfil U.
6. Se realizan los taladros para la sujeción del perfil a la viga de madera.
7. Se coloca el perfil adosado a la viga de madera a través de pernos.
8. Relleno del interior del perfil con mortero de alta resistencia.
9. Se deja reposar el tiempo suficiente para que se produzca el curado del mortero de alta resistencia.
10. Se vuelven a colocar las viguetas nuevas y se reconstruye el entablado.
11. Macizado de los huecos de pared, que se realizaran para la colocación del perfil.
12. Finalmente se retiran los apeos, para que el forjado vuelva a entrar en carga.

Medición y presupuesto

Ud Apeo viga.

Ud Montaje y desmontaje de apeo en viga. Compuesto por puntales metálicos telescópicos, amortizables en 50 usos y tabloncillos de madera, amortizables en 4 usos. Intereje de puntales 1,6 m. altura puntal de 2,5 m.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10				10	10	15,82 €	158,20 €

m² Demolición de forjado de madera.

m² Demolición de forjado, que incluye corte de cabezas de vigas, levantamiento de viguetas de madera y entrevigado de tablero de madera, con medios manuales y motosierra, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	8,17	1,65		13,4805	13,4805	19,42 €	261,79 €

m³ Vigueta de madera aserrada.

m³ Vigueta de madera aserrada de castaño, de 11x13 cm de sección y 2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra y medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10	2	0,11	0,13	0,29	0,29	651,59 €	186,35 €

m² Entarimado tradicional sobre rastreles.

m² Entarimado tradicional de tablas de madera maciza de pino gallego de 70x22 mm, colocado a rompejuntas sobre rastreles de madera de castaño de 11x13 cm, fijados mecánicamente al soporte cada 25 cm.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	8,17	1,65		13,4805	13,4805	66,77 €	900,09 €

m² Capa fina de mortero autonivelante de cemento.

m² Capa fina de mortero, de 5 mm de espesor, aplicada manualmente, para regularización y nivelación de la superficie soporte interior de hormigón o mortero.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6		0,34	0,05	0,10	0,10	8,42 €	0,86 €

m² Apertura de hueco en muro de mampostería.

m² Apertura de hueco en muro de mampostería de espesor 20 cm, con medios manuales, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
12	0,20	0,05	0,35	0,04	0,04	148,20 €	6,22 €

m² Refuerzo de forjado de madera por su cara inferior, mediante perfil U metálico.

m² Refuerzo de vigas de forjado de madera mediante la colocación, por su cara inferior, de perfil U de acero S275JO con capa de imprimación anticorrosiva, anclada a la viga con 8 fijaciones por metro de refuerzo metálico, formadas por pernos de acero, de 9 mm de diámetro y 240 mm de longitud; relleno del interior de la pieza en U con mortero de alta resistencia, a base de cemento mejorado con resinas sintéticas, humo de sílice y fibras de poliamida, de alta resistencia mecánica y retracción controlada.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6	1,06	0,24		1,526	1,53	123,82 €	189,00 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas) 1.710,19 €
Coste por metro cuadrado (€/m²) 126,86 €

➤ **Alternativa 2:** Prótesis de madera cosida con varillas de fibra de vidrio.
(Plano I 02)

Proceso de ejecución

1. Colocación de apeo, compuesto por puntales metálicos; sopandas y durmientes de madera.
2. Levantamiento del entablado adosado a la zona próxima a la cabeza de viga.
3. Se retiran las viguetas dañadas.
4. Se sana la viga, haciendo un corte inclinado por la zona sana.
5. Se limpia el hueco dejado por la pieza y se realiza una base con mortero de nivelación para la colocación de la nueva pieza.
6. Se coloca la prótesis de madera, ésta será tendrá las mismas características y escuadría que la pieza eliminada.
7. Colocación de un apeo bajo la prótesis para sostener la pieza, y proceder a realizar los talados donde se ubicarán las varillas de fibra de vidrio.
8. Tras la colocación de las varillas se introduce una resina epoxi en las perforaciones, para rellenar el hueco generando la perfecta vinculación entre la pieza nueva y la existente a través de las varillas.
9. Se deja reposar el tiempo suficiente para que se produzca el curado de la resina epoxi.
10. Se vuelven a colocar las viguetas nuevas y se reconstruye el entablado
11. Finalmente se retiran los apeos, para que el forjado vuelva a entrar en carga.

Medición y presupuesto

Ud Apeo viga.

Ud Montaje y desmontaje de apeo en viga. Compuesto por puntales metálicos telescópicos, amortizables en 50 usos y tabloncillos de madera, amortizables en 4 usos. Intereje de puntales 1,6 m. altura puntal de 2,5 m.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10				10	10	15,82 €	158,20 €

m² Demolición de forjado de madera.

m² Demolición de forjado, que incluye corte de cabezas de vigas, levantamiento de viguetas de madera y entrevigado de tablero de madera, con medios manuales y motosierra, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	8,17	1,65		13,4805	13,4805	19,42 €	261,79 €

m³ Viga de madera aserrada.

m³ Viga de madera aserrada de pino castaño, 22x34 cm de sección y 1,2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra y medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6	1,20	0,22	0,34	0,54	0,54	644,92 €	347,33 €

m³ Vigüeta de madera aserrada.

m³ Vigüeta de madera aserrada de castaño, de 11x13 cm de sección y 2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra y medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10	2	0,11	0,13	0,29	0,29	651,59 €	186,35 €

m² Entarimado tradicional sobre rastreles.

m² Entarimado tradicional de tablas de madera maciza de pino gallego de 70x22 mm, colocado a rompejuntas sobre rastreles de madera de castaño de 11x13 cm, fijados mecánicamente al soporte cada 25 cm.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	8,17	1,65		13,4805	13,4805	66,77 €	900,09 €

m² Capa fina de mortero autonivelante de cemento.

m² Capa fina de mortero, de 5 mm de espesor, aplicada manualmente, para regularización y nivelación de la superficie soporte interior de hormigón o mortero.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6		0,25	0,25	0,38	0,38	8,42 €	3,16 €

m² Apertura de hueco en muro de mampostería.

m² Apertura de hueco en muro de mampostería de espesor 20 cm, con medios manuales, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6		0,27	0,43	0,70	0,70	9,40 €	6,55 €

m Barra fibra de vidrio, L=6m, DN=9,53mm, Maperod G, Refuerzo estructural.

m Barra pultrusa de fibra de vidrio, preimpregnadas con viniléster epoxi modificado, (módulo elástico 40.800 N/mm²), de 6 m de longitud y un diámetro de 10 mm, para el refuerzo estructural de elementos de madera. Incluso puesta en obra.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10	0,85			8,50	8,50	9,00 €	76,50 €

m Banda elástica neopreno para apoyo de viga.

m Banda flexible de polietileno reticulado de celda cerrada, de 2 mm de espesor y 350 mm de ancho, colocada en los huecos de las viga.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6	0,27			1,62	1,62	2,13 €	3,45 €

Ud Anclaje químico estructural sobre madera, mediante cartucho de inyección de resina.

Ud Anclaje químico estructural realizado sobre madera, mediante taladro de 15 mm de diámetro y 275 mm de profundidad, relleno del orificio con inyección de resina epoxi, libre de estireno, y posterior inserción de varilla de fibra de vidrio, de 9 mm de diámetro y 270 mm de longitud.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10				10	10,00	8,42 €	84,20 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas) 2.027,62 €
Coste por metro cuadrado (€/m²) 150,41 €

➤ Conclusiones comparativas.

Los planteamientos de intervención se basan en sanear un elemento estructural que está gravemente dañado por pudrición, esto implica la necesidad de sustituir la parte afectada por una pieza nueva que la remplace. Por ello, se presentan la opción de una prótesis de madera y el uso de un perfil, cada sistema supone unas ventajas y unos inconvenientes que se desarrollan a continuación.

La colocación de una pieza nueva hecha con el mismo material que el existente permite dar uniformidad estética y consigue una homogeneización entre la estructura inicial y el refuerzo, además el método de vinculación utilizado, cosido con varillas de vidrio, permite que dicha unión no se aprecie visualmente. Además otra ventaja a destacar es la resistencia al fuego de la madera, y a pesar de que las resinas utilizadas en la unión son sensibles al fuego, al albergarse dentro de la pieza, la vinculación queda protegida por la madera, evitando el colapso de la estructura por el fallo de la unión. En cambio el tiempo de puesta en obra está condicionado por: la necesidad de apeo y el tiempo de curado que las resinas necesitan para adquirir la resistencia suficiente que provoque una vinculación íntima entre los materiales, lo que supone un tiempo extra. Y el volumen que presentan las piezas dificultan la trabajabilidad y el transporte.

Por otra parte, cuando utilizamos un refuerzo metálico la vinculación entre la estructura existente y la pieza de sustitución (perfil U) se realiza mediante unión con fijaciones metálicas, ello supone una reducción de tiempo en la puesta en obra. Otra gran ventaja del refuerzo con metal es la resistencia a ataques bióticos, pero en cambio si presenta debilidad ante la corrosión. El fuego también es un agente que lo debilita fácilmente, ya que su resistencia a éste es escasa.

En cuanto a la facilidad de manejo podríamos decir que comparten la misma desventaja ya que son materiales de peso elevado.

Si se tiene en cuenta el valor económico que supone realizar uno u otro sistema, con el uso del perfil U se obtendría un ahorro de un 20%.

Por último barajar la posibilidad de una sustitución completa de la estructura en vez de una sustitución parcial supondría un incremento importante del coste de la intervención con respecto a los métodos planteados. Por lo tanto esta posibilidad no resulta ventajosa

en este caso. A continuación se muestra la medición y el presupuesto de la sustitución de todo el forjado.

m² Demolición de forjado de madera.

m² Demolición de forjado, levantamiento de viguetas de madera, entrevigado de tablero de madera, y retirada de las vigas, con medios manuales y motosierra, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Área	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	47,36	47,36	47,36	19,42 €	919,73 €

m³ Viga de madera aserrada.

m³ Viga de madera aserrada de pino castaño, 22x34 cm de sección y 1,2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra y medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6	6,20	0,22	0,34	2,78	2,78	644,92 €	1.794,53 €

m³ Vigueta de madera aserrada.

m³ Vigueta de madera aserrada de castaño, de 11x13 cm de sección y 2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra y medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10	2,02	0,11	0,13	1,88	1,88	651,59 €	188,22 €

m² Entarimado tradicional sobre rastreles.

m² Entarimado tradicional de tablas de madera maciza de pino gallego de 70x22 mm, colocado a rompejuntas sobre rastreles de madera de castaño de 11x13 cm, fijados mecánicamente al soporte cada 25 cm.

Uds.	Área	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	47,36	47,36	47,36	66,77 €	3.162,23 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas)	6.064,71 €
Coste por metro cuadrado (€/m²)	128,06 €

Caso 2: Intervención en vigas del entramado horizontal.

La causa de intervención es la deformación excesiva que presentan las vigas de forjado en algunos de los espacios de la edificación.

Para el estudio y comparación de los sistemas que a continuación se plantean, se toma como referencia el forjado que separa la estancia dos de la primera planta de la estancia uno de la planta baja. (Plano I 02)

Se realiza una comprobación estructural de las vigas que componen el forjado, para verificar si es necesario la colocación de un refuerzo, de acuerdo con lo establecido en el DB-SE-M.

*Comprobación estructural en viga de forjado mediante sistema informático*Datos viga madera castaño

Densidad media	590 kg/m ³
Longitud	5,90 m
Base	0,22 m
Altura	0,34 m
Clase de madera	Frondosa D24

Cálculo de resistencia de viga existente

Cargas permanentes	kN/m ²	kN/m
Tarima de madera y rastrel	0,40 kN/m ²	
Peso tabiquería	1,00 kN/m ²	
Peso propio de las viguetas	0,17 kN/m ²	
Peso propio viga	0,24 kN/m ²	
Total	1,82 kN/m ²	3,3 kN/m
Cargas variables		
Sobrecarga de uso (carga uniforme); Categoría A. Subcategoría A1. CTE (SE-AE Tabla 3.1)	2 kN/m ²	3,60 kN/m

Cálculos

CARGAS PERMANENTES

- Tarima de madera y rastrel: 0,40 kN/m²
- Peso tabiquería: 1 kN/m²
- Peso propio de las viguetas, sección 0,10 x 0,13 m de clase resistente D24 (590 kg/m³) con un intereje de 0,45 m:

$$0,10 \cdot 0,13 \cdot 590 = 7,67 \text{ kg/m}$$

$$7,67/0,45 = 17 \text{ kg/m}^2 = 0,17 \text{ kN/m}^2$$

- Peso propio viga 0,22 x 0,34 m de clase resistente D24 (590 kg/m³) con intereje de 1,80 m:

$$0,22 \cdot 0,34 \cdot 590 = 44,132 \text{ kg/m}$$

$$44,132/1,80 = 24,50 \text{ kg/m}^2 = 0,245 \text{ kN/m}^2$$

Total carga permanente: $0,40 + 1 + 0,17 + 0,245 = 1,815 \text{ kN/m}^2$

Para una separación entre ejes de vigas de 1,80 m

$$q_p = 1,815 \cdot 1,80 = \mathbf{3,3 \text{ kN/m}}$$

CARGAS VARIABLES

- Sobrecarga de uso en viviendas: 2 kN/m^2 (Categoría A. Subcategoría A)

Para una separación entre ejes de vigas de 1,80 m

$$q_v = 2 \cdot 1,80 = \mathbf{3,60 \text{ kN/m}}$$

Resultados obtenidos del programa informático

Cargas y Longitud en Vigas

En esta sección hay que introducir el peso debido a la sobrecarga de uso y las debidas a peso propio, como pp del forjado, pavimentos y tabiquería. En el caso de vigas inclinadas en cubierta, puede existir una componente axial.

$q_{su} = 3,60 \text{ kN/ml}$

$q_{pp} = 3,30 \text{ kN/ml}$ $q_{ppv} = 3,78 \text{ kN/ml}$, sumando el pp de la viga

$L = 5,90 \text{ m}$, longitud de cálculo de la viga

Elegir el tipo de viga de entre los siguientes: **VIGA 1 - Biapoyada**

COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL DE VIGAS DE MADERA MACIZA Y LAMINADA SOMETIDAS A CARGA DE FUEGO

Flexión simple y compuesta

Obra: _____

Tipo de pieza: _____

Clase de madera: **D30** **FRONDOSAS**

$f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a flexión
$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a cortante
$E_m = 12,0 \text{ kN/mm}^2$	Módulo elasticidad medio
$\rho_m = 6,4 \text{ kN/m}^3$	Densidad media

Resist. al fuego: **Sin comprobación**

Def = **0,0 mm** Profundidad de carbonización

Caras expuestas: **Inferior y laterales**

Clase de servicio: **CS 1**
Interior seco (Temp > 20°C, Humedad < 65%)

Propiedades de la sección

$B = 22 \text{ cm}$	$I = 72,057 \text{ cm}^4$	Momento de inercia (de la sección completa)
$H = 34 \text{ cm}$	$W = 4,238 \text{ cm}^3$	Momento resistente (de la sección completa)
Area = 748,0 cm²		
Peso = 0,48 kN/ml		

$B_{ef} = 22,0 \text{ cm}$	$I_{ef} = 72,057 \text{ cm}^4$	Momento de inercia (de la sección eficaz)
$H_{ef} = 34,0 \text{ cm}$	$W_{ef} = 4,238 \text{ cm}^3$	Momento resistente (de la sección eficaz)
$A_{ef} = 748,0 \text{ cm}^2$		

Estado límite último flexión

$f_{m,d} = 18,5 \text{ N/mm}^2$	>	$\sigma_d = 10,8 \text{ N/mm}^2$
Capacidad resistente máxima a flexión del material	59%	Tensión aplicada en la sección eficaz

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_{ft} \cdot \frac{f_{m,k}}{Y_m} > \sigma_d = \left(\frac{N_{pp}^* + N_{su}^*}{A_{ef}} + \frac{M_{pp}^* + M_{su}^*}{W_{ef}} \right)$$

Cargas y coeficientes

Cargas permanentes		Sobrecargas de uso		
$N_{pp} = 1,00 \text{ kN}$		$N_{su} = 1,00 \text{ kN}$		Axial
$N_{pp}^* = 1,35 \text{ kN}$		$N_{su}^* = 1,50 \text{ kN}$		Axial mayorado
$M_{pp} = 22,20 \text{ m·kN}$		$M_{su}^* = 23,50 \text{ m·kN}$		Momento flector mayorado
$V_{pp} = 15,05 \text{ m·kN}$		$V_{su}^* = 15,93 \text{ m·kN}$		Cortante mayorado
$\gamma_{pp} = 1,35$		$\gamma_{su} = 1,50$		Coef. Mayoración cargas

$k_{cr} = 0,67$	Factor de corrección por influencia de fendas en esfuerzo cortante
$k_{fi} = 1,00$	Factor de modificación en situación de incendio
$k_{mod} = 0,80$	Factor de modificación según ambiente y tipo de carga
$k_h = 1,00$	Coef. Que depende del tamaño relativo de la sección
$Y_m = 1,30$	Coef. Parcial seguridad para cálculo con madera maciza

Estado límite último cortante

$f_{v,d} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	>	$\tau_d = 0,9 \text{ N/mm}^2$
Capacidad resistente máxima a cortante del material	38%	Cortante aplicada en la sección eficaz

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot k_{ft} \cdot \frac{f_{v,k}}{Y_m} > \tau_d = \left(1,5 \cdot \frac{V_{pp}^* + V_{su}^*}{k_{cr} \cdot A_{ef}} \right)$$

Comprobación de flecha

La flecha de un elemento estructural se compone de dos términos, la instantánea y la diferida, causada por la fluencia del material, que en el caso de la madera es bastante apreciable.

La flecha instantánea, se calcula con la formulación tradicional de la resistencia de materiales; al tratarse de un Estado Límite de Servicio y no Estado Límite último, las cargas NO se mayoran

$\delta' = 0,01302$

$$\delta = \delta' \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I}$$

Por tanto la formulación de la flecha total de una viga de madera será:

$$\delta_{tot} = \delta_{pp} \cdot (1 + k_{def}) + \delta_{su} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def})$$

Dónde: $k_{def} = 0,60$	es el factor de fluencia para CS 1
Dónde: $\psi_2 = 0,30$	para cargas de corta duración

$\delta_{pp} = 6,89 \text{ mm}$	Flecha instantánea debida a carga permanente
$\delta_{su} = 6,57 \text{ mm}$	Flecha instantánea debida a sobrecarga de uso

Triple Condición de cumplimiento

Para garantizar integridad de elementos constructivos, la flecha debida a la fluencia, más la motivada por la carga variable no ha de ser superior a:

$K_{def} \cdot \delta_{pp} + (1 + \psi_2 \cdot K_{def}) \cdot \delta_{su}$	<	L/500 Con luces grandes, pav. Rígidos sin juntas y tabiques frágiles
11,89 mm = L/496	>	L/500 = 11,80 mm

Para asegurar el confort de los usuarios la flecha debida a cargas de corta duración deberá ser inferior a L/350

δ_{su}	<	L/350
6,57 mm = L/898	<	L/350 = 16,86 mm

La apariencia de la obra será adecuada cuando la flecha no supere L/300 con cualquier combinación de carga

$(1 + K_{def}) \cdot \delta_{pp} + (1 + \psi_2 \cdot K_{def}) \cdot \delta_{su} \cdot \psi_2$	<	L/300
13,36 mm = L/442	<	L/300 = 19,67 mm

NO CUMPLE

Conclusión

El dimensionado inicial cumpliría en cuanto a resistencia de la pieza a flexión simple y compuesta, pero la flecha que presentan las vigas es superior a la flecha límite por lo tanto el dimensionado no es válido, se debe reforzar la estructura. Los métodos propuestos son los siguientes:

➤ **Alternativa 1:** Sistemas mixto madera-hormigón. (Plano I 03)

Proceso de ejecución

1. Se apea la estructura, de forma que se consigue recuperar en la medida de lo posible la deformación sufrida en las vigas.
2. Se levanta el entablado en las zonas donde están ubicadas las vigas.
3. Se colocan piezas de madera adosadas a las vigas en los huecos entre viguetas, para conformar el encofrado evitando que se pierda el hormigón al ser vertido.
4. Colocación de una lámina de plástico sobre el entablado, para evitar pérdidas de hormigón a través de las juntas.
5. Disposición de los conectores sobre el entablado y las vigas.
6. Colocación de la malla electrosoldada.
7. Se vierte el hormigón sobre el forjado.
8. Finalmente tras el endurecimiento de la capa de hormigón se puede proceder a la retirada del sistema de apeo y de las piezas de encofrado.

Medición y presupuesto

Ud Apeo viga.

Ud Montaje y desmontaje de apeo en forjado. Compuesto por puntales metálicos telescópicos, amortizables en 50 usos y tabloncillos de madera, amortizables en 4 usos. Intereje de puntales 1,6 m. altura puntal de 2,5 m.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
18				18	18	15,8 €	284,76 €

m² Refuerzo de forjado de madera, mediante conectores y hormigón ligero.

m² Refuerzo de forjado de viguetas de madera, mediante la disposición de conectores tipo CTL Maxi Tecnaria, fijados a las vigas y viguetas con tornillos de diámetro 10 mm y longitud 120 mm, 18 conectores por m² de forjado, colocación de malla electrosoldada ME 20x20 Ø 5-5 B 500 T 6x2,20 UNE-EN 10080 y vertido de capa de compresión de 8 cm de espesor de hormigón ligero HLE-25/B/10/IIa, densidad entre 1200 y 1500 kg/m³, (cantidad mínima de cemento 275 kg/m³), fabricado en central, y vertido con cubilote.

Uds.	Área	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	47,23	47,23	47,23	71,1 €	3.355,69 €

m² Encofrado.

m² de encofrado y desencofrado realizado con piezas de madera aserrada de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) de dimensiones 34x40 cm y espesor de 5 cm, clase resistente C-18 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, trabajada en taller. Incluso fijación mecánica mediante clavos.

Uds.	Área	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	47,36	47,36	47,36	19,00	899,84 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de taxes) 4.540,29 €
Coste por metro cuadrado (€/m²) 95,87 €

➤ **Alternativa 2:** Consolidación con perfiles UPN laterales. (Plano I 04)

Justificación a deformación del perfil UPN-300 propuesto como elemento de refuerzo, cumplimiento de flecha.

$$I_y = 2 \cdot 8066,44 \cdot 10^4 = 161328800$$

$$f_{IG} = (0,013 \cdot 3,3 \cdot 5900^4) / (210000 \cdot 161328800) = 1,53 \text{ mm}$$

$$f_{I_{Q_{uso}}} = (0,013 \cdot 3,6 \cdot 5900^4) / (210000 \cdot 161328800) = 1,67 \text{ mm}$$

$$\text{Combinación casi permanente: } G + \psi_2 \cdot Q_{uso} \quad \psi_2 = 0,3$$

$$f_{total} = 1,53 + 0,3 \cdot 1,67 = 2,03 \text{ mm}$$

$$f_{limite} = L/400 = 5900/400 = 14,75 \text{ mm}$$

$$f_{limite} > f_{total} \quad \text{CUMPLE}$$

Proceso de ejecución

1. Se apea la estructura, buscando recuperar la deformación producida en la viga.
2. Se harán dos huecos en el muro a los lados de la viga afectada y se construirá una base con mortero de nivelación para que la repartición de las cargas de las vigas de refuerzo.
3. Se colocarán dos perfiles laminados UPN cogidos a ambos lados de la viga afectada (previa protección de sus cabezas con pinturas antioxidantes).
4. Se colocarán pernos pasantes entre las dos nuevas vigas de refuerzo y la madera existente para que actúen a la vez.
5. Se rellenarán de nuevo los agujeros hechos para apoyar las vigas de refuerzo.
6. Se llenarán con cuñas los posibles espacios que pudiesen haber quedado entre las nuevas vigas y el techo, ya que es imprescindible para hacer entrar en carga el forjado.

Medición y presupuesto**Ud Apeo viga.**

Ud Montaje y desmontaje de apeo en forjado. Compuesto por puntales metálicos telescópicos, amortizables en 50 usos y tabloncillos de madera, amortizables en 4 usos. Intereje de puntales 1,6 m. altura puntal de 2,5 m.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
18				18	18	15,82 €	284,76 €

m² Apertura de hueco en muro de mampostería.

m² Apertura de hueco en muro de mampostería de espesor 20 cm, con medios manuales, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
12		0,48	0,34	1,96	1,96	9,40 €	18,41 €

Ud Refuerzo de viga de madera en sus caras laterales, mediante perfiles UPN 300.

Ud Refuerzo metálico en la caras laterales de viga de madera en mal estado o deteriorada, mediante la colocación de dos perfiles UPN 300, de acero laminado S275JR, de 570 cm de longitud, anclados a la viga, mediante pernos pasantes de diámetro 10 mm con separaciones entre ellos de 50 cm. Incluso relleno de hueco sobre el que se empotran los perfiles metálicos con hormigón. Puesta en obra con medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6				6	6	380,74 €	2.284,44 €

m³ Relleno de hueco en muro de mampostería.

m³ Relleno de hueco en muro de mampostería de espesor 20 cm, de hormigón ligero estructural HLE-25/B/10/IIa, de entre 1200 y 1500 kg/m³ de densidad, cantidad mínima de cemento 275 kg/m³, fabricado en central. Incluso medios auxiliares.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
2	0,2	0,13	0,34	0,02	0,02	148,20 €	2,62 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas) 2.590,23 €
Coste por metro cuadrado (€/m²) 54,69 €

➤ Conclusiones comparativas.

La comparativa económica entre estos dos sistemas es muy significativa, la realización de una consolidación mediante vigas metálicas resulta 57% más económico que la implantación de un forjado mixto madera-hormigón.

Una de las ventajas que proporciona la implantación de un forjado mixto de hormigón-madera es la disposición del refuerzo en la parte superior, permitiendo conservar la estructura de madera intacta en la zona inferior, y como estamos ante una intervención en un pazo, con esta opción se permite conservar elementos que posean algún tipo de

valor histórico. Otra ventaja importante es la gran resistencia que presenta el hormigón al fuego, por ello con la colocación de este tipo de forjados se aumenta la resistencia ante la posible presencia de fuego. El hormigón por sus características materiales no solo presenta gran resistencia a este agente abiótico, sino que además presenta resistencia ante ataques bióticos también es muy elevada.

Por otro lado, las dificultades de encofrado que presenta la ejecución del sistema madera-hormigón en este caso, debido a la obligación de disponer pequeñas piezas que tapen los huecos entre vigueta y viga, lo convierte en un sistema de ejecución lenta. Además el necesario incremento de espesor del piso, que supone el vertido de la capa de hormigón, afecta a la altura libre de la estancia y aunque el espesor ronda entre los 5-8 cm también puede crear problemas con las aperturas de puertas y supone la aparición de un desnivel entre estancias contiguas. Sobre el tiempo de ejecución, intervienen principalmente el tiempo necesario para la distribución conectores, encargados de la vinculación entre los dos materiales, y el tiempo de curado de la capa de hormigonado, esto se traduce en un proceso de ejecución bastante lento.

El uso de elementos metálicos como refuerzo, proporcionan ventajas como: la gran resistencia a ataques bióticos aunque presentan debilidad ante la corrosión. La elevada resistencia del acero permite la elaboración de piezas de dimensiones relativamente pequeñas, en comparación con otros materiales, que soportan elevadas cargas. También la ejecución en seco de este sistema favorece a los elementos de madera, evitando los problemas derivados de la humedad.

La resistencia al fuego de los metales es baja, lo que hace de vital importancia el estudio de protecciones contra el fuego, para aumentar su resistencia ante éste. Finalmente apuntar que la colocación por la parte inferior del forjado de los perfiles metálicos resulta un inconveniente con respecto al sistema mixto madera-hormigón, ya que el trabajo en la cara superior es más cómodo. El trabajo por debajo del forjado dificulta la disposición de los elementos en su lugar y la ejecución de los anclajes. Además se requiere de medios auxiliares como es el caso de los andamios para poder trabajar en altura.

El planteamiento de la sustitución de todo el forjado, en este caso resulta ser una opción poco ventajosa económicamente. La colocación de elementos nuevos supone, según la alternativa a comparar, un incremento del coste en un 74% o 42%. Por ello no es recomendable sustituir todo el forjado por uno completamente nuevo. A continuación se muestra la medición y el presupuesto de la sustitución de todo el forjado:

m² Demolición de forjado de madera.

m² Demolición de forjado, levantamiento de viguetas de madera, entrevigado de tablero de madera, y retirada de las vigas, con medios manuales y motosierra, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Área	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	47,36	47,36	47,36	19,42 €	919,73 €

m³ Viga de madera aserrada.

m³ Viga de madera aserrada de pino castaño, 22x34 cm de sección y 1,2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra y medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
6	6,20	0,22	0,34	2,78	2,78	644,92 €	1.794,53 €

m³ Vigüeta de madera aserrada.

m³ Vigüeta de madera aserrada de castaño, de 11x13 cm de sección y 2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra y medios auxiliares necesarios.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
10	2,02	0,11	0,13	1,88	1,88	651,59 €	188,22 €

m² Entarimado tradicional sobre rastreles.

m² Entarimado tradicional de tablas de madera maciza de pino gallego de 70x22 mm, colocado a rompejuntas sobre rastreles de madera de castaño de 11x13 cm, fijados mecánicamente al soporte cada 25 cm.

Uds.	Área	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	47,36	47,36	47,36	66,77 €	3.162,23 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas) 6.064,71 €
Coste por metro cuadrado (€/m²) 128,06 €

Caso 3: Intervención en estructura de cubierta, cerchas.

La cubierta ya ha sido reformada con anterioridad, por lo tanto todos los elementos de la cubierta cumplen las condiciones estructurales en cuanto a estabilidad y deformación. La intervención que se plantea se basa en rehabilitar una pieza concreta de la cercha C, en la que se ha detectado una rotura puntual. La causa de dicha rotura se relaciona con la calidad de la madera de la pieza, hipótesis de existencia de nudos perjudiciales.

- **Alternativa 1:** Consolidación mediante aporte de piezas de madera. (Plano I 05)

Proceso de ejecución

1. Colocación de apeo metálico debajo de la zona donde se ha producido la rotura.
2. Apertura de huecos en muros, para ubicar las piezas de refuerzo.
3. Disposición taladros para colocación de los pernos que vincularán la pieza existente con los elementos de refuerzo.
4. Se colocan las piezas de madera adosadas a la pieza dañada unida con los pernos.
5. Se retira el apeo.

Medición y presupuesto

Ud Apeo viga.

Ud Montaje y desmontaje de apeo en forjado. Compuesto por puntal metálico telescópicos, amortizables en 50 usos y tabloncillos de madera, amortizables en 4 usos. Altura puntal de 3 m

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1				1	1	15,82 €	15,82 €

m² Apertura de hueco en muro de mampostería.

m² Apertura de hueco en muro de mampostería de espesor 23 cm, con medios manuales, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
2		0,12	0,34	0,08	0,08	9,40 €	0,77 €

m² Refuerzo de pieza inferior de cordón de cercha, mediante piezas de madera y fijación mecánica.

m² Refuerzo de pieza inferior de cordón inferior de cercha, mediante la disposición de dos piezas de madera de dimensiones 100x440x2930 mm, fijadas con 12 pernos de diámetro 9 mm. Incluye puesta en obra.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	2,93	0,47		1,38	1,38	150,70 €	207,53 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas) 224,12 €
Coste por metro cuadrado (€/m²) 162,74 €

➤ **Alternativa 2:** Consolidación con bandas FRP. (Plano I 06)Proceso de ejecución

1. Preparación del soporte: limpieza.
2. Preparación de los laminados: comprobar la longitud antes de cortarlo y aplicarlo. Realizar una limpieza de los Laminados eliminando polvo residual, aceite, grasa, contaminantes, etc.
3. Preparación del adhesivo.
4. Aplicar una capa de adhesivo en el soporte y otra capa de adhesivo sobre las bandas de FRP.
5. Aplicación de las láminas pasando el rodillo de goma dura, apretando la banda sobre el soporte, para asegurar el pleno contacto con el soporte.
6. Tras aplicar la primera capa como se ha descrito anteriormente y antes de colocar una segunda capa de bandas se vuelve hacer una limpieza sobre las láminas ya colocadas.

Medición y presupuesto**m² Refuerzo mediante colocación de bandas FRP.**

m² Refuerzo de pieza inferior de cordón inferior de cercha, mediante la disposición de láminas de fibra de carbono, pre impregnada con resina epoxídica, protegida por una doble película de plástico. Modulo elástico de 170.000 N/mm², 1,4 mm de espesor, fijadas a la pieza s a través de adhesivo Sikadur 30, adhesivo a base de resina epoxi, de dos componentes. Incluye puesta en obra, limpieza y preparación del soporte base

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	2,30	0,34		0,78	0,78	512,97 €	401,14 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas)	401,14 €
Coste por metro cuadrado (€/m²)	512,97 €

➤ Conclusiones comparativas.

Ambos sistemas son refuerzos parciales. Estos refuerzos puntuales en las maderas dañadas son viables para recuperar, en tramos pequeños, las secciones de las piezas afectadas.

El aspecto visual en una rehabilitación es un factor importante a considerar, sobre todo cuando se trata de una intervención en una zona concreta, ya que la armonía que presentaba una estancia puede verse alterada. En el presente caso la colocación de la viga de madera reduce el impacto visual, puesto que parte de los elementos que lo rodean también son de este material. Las bandas de FRP como material presentan un aspecto y color diferente a la madera, esto remarca la presencia de dicho refuerzo, dificultando su integración en la estancia.

En cambio, gracias a las láminas FRP conseguimos ventajas como es el poco peso que le aporta a otro elemento, ya que son láminas finas y ligeras que no aumentan carga en los elementos reforzados. Como material presenta gran resistencia a esfuerzos de compresión, tracción, flexión y cortante. Su flexibilidad y facilidad de manejo suponen que el tiempo de puesta en obra sea muy reducido. También presentan facilidad de transporte gracias a las anteriores características mencionadas. La longitud no

restringida y la gran adaptación a los soportes convierten a las láminas de FRP en materiales de construcción válidos para casi cualquier pieza sin importar su forma geométrica. No presentan problemas en cuanto a posibles cruces de las láminas. Destacar su facilidad de instalación y que es un material que no sufre corrosión ni es vulnerable a los ataques químicos. Como se ve son múltiples las virtudes que aporta este material ante su uso en un refuerzo pero hay que tener presente que el costo de este material es bastante elevado y es sensible a las acciones del fuego.

La madera en contraposición a las láminas de FRP si presentan una buena resistencia al fuego, la capa de carbonización que crea le aporta un mayor aguante frente a este agente abiótico. Pero en cuanto a las demás características presenta bastante deficiencia, un ejemplo de esto es el elevado peso del material que dificulta el manejo de las piezas y su puesta en obra es lenta afectando al tiempo de colocación. Por otro lado la geometría y el volumen que pueden presentar ciertas piezas de madera suponen dificultades a la hora de transportarlas. Finalmente podríamos destacar en comparación con las láminas que el coste del material es muy inferior, aunque este varía en función del tipo de madera a emplear.

Por último, de la misma forma que se viene comentando en los casos anteriores contemplar la posibilidad de sustituir la pieza dañada puede resultar ser la mejor intervención. La colocación de un tirante nuevo en este caso supone un coste inferior, en la alternativa de aporte de madera supone un ahorro del 56%, y en la otra alternativa se consigue ahorrar el 22%, así que la sustitución sería la elección más adecuada valorando los condicionantes que se presentan en la intervención. A continuación se muestra el desglose de la medición y presupuesto que supone la sustitución en este caso:

Ud Apeo estructura cercha.

Ud Montaje y desmontaje de apeo en cercha. Compuesto por puntal metálico telescópicos, amortizables en 50 usos y tabloncillos de madera, amortizables en 4 usos. Altura puntal de 5 m.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1				1	1	15,82 €	15,82 €

m³ Viga de madera aserrada.

m³ Viga de madera aserrada de pino castaño, 22x34 cm de sección y 1,2 m de longitud, clase resistente D-24, protección de la madera con clase de penetración NP2, trabajada en taller. Incluso puesta en obra, medios auxiliares necesarios y anclajes.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	3,20	0,22	0,34	0,24	0,24	644,92 €	154,37 €

m² Retirada de pieza de madera.

m² Retirada de pieza de cercha, corte y retirada de pieza situada en el cordón inferior de la cercha de una profundidad de 22 cm, con medios manuales y motosierra, y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Uds.	Longitud	Anchura	Altura	Parciales	Medición	Precio	Presupuesto
1	3,2		0,34	0,34	0,34	19,42 €	6,60 €

Coste total de la intervención en la zona a reforzar (ausente de tasas) 176,79 €
Coste por metro cuadrado (€/m²) 162,49 €

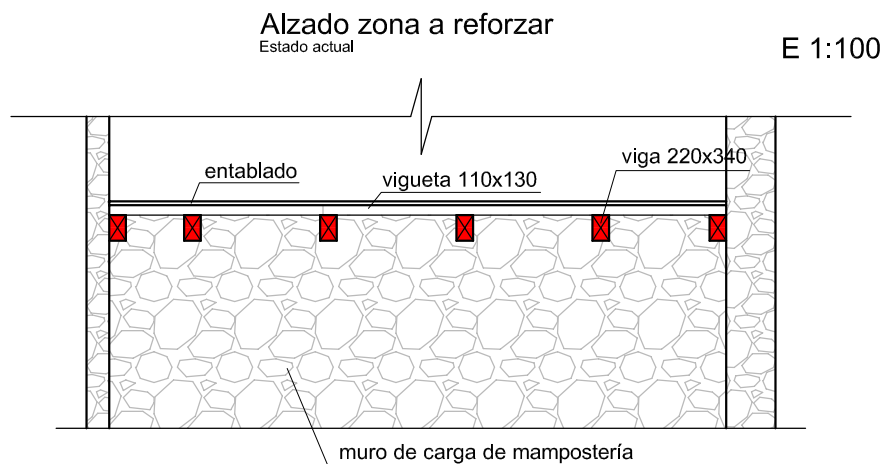
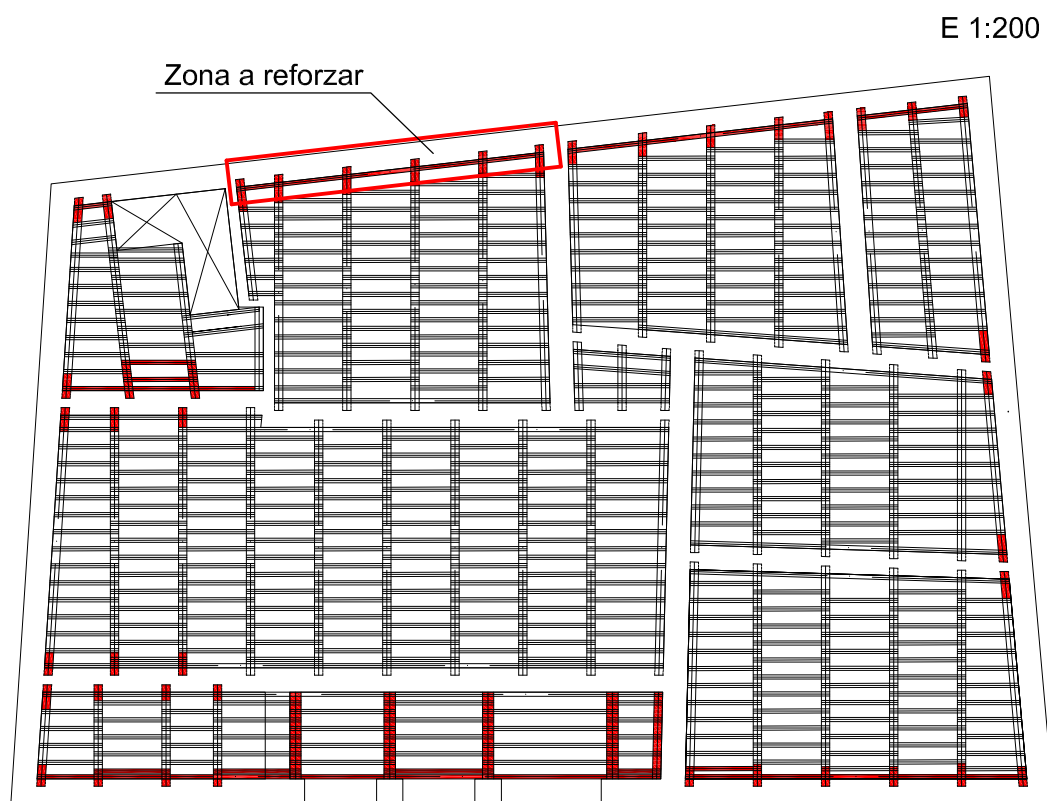
PLANOS

	▪ Intervención
I 01	Caso 1: Consolidación mediante perfil U
I 02	Caso 1: Sistema de prótesis
I 03	Caso 2: Sistema mixto madera-hormigón
I 04	Caso 2: Consolidación perfiles laterales metálicos
I 05	Caso 3: Consolidación con aporte de madera
I 06	Caso 3: Consolidación bandas FRP

CASO 1: Intervención en cabezas de viga - alternativa 1

Daño

Pudrición en cabeza de viga, por ataque de hongos xilófagos. El alcance del daño es grave, afecta a la capacidad portante del elemento estructural.



Propuesta de refuerzo: consolidación a través de perfil en U.

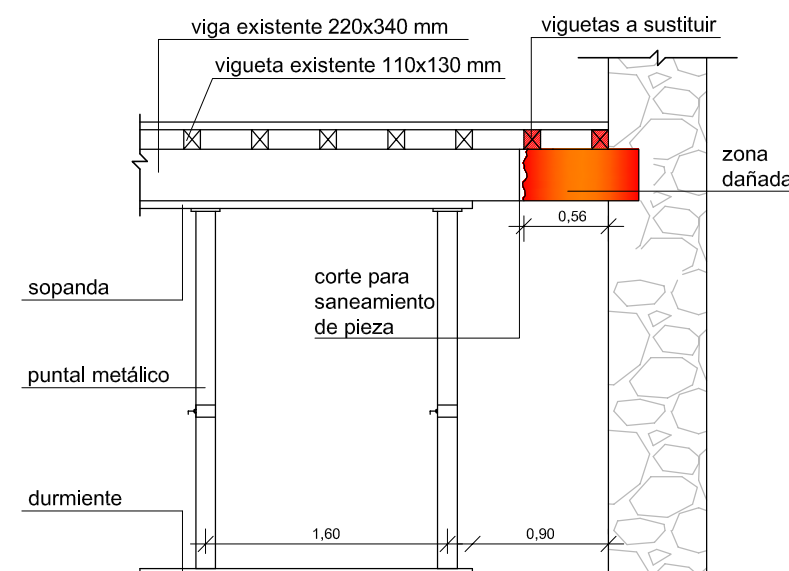
El sistema propuesto para reforzar la zona dañada consiste en la colocación de un perfil en U empotrado en el muro y unido a la viga de madera mediante pernos pasantes.

Pasos ejecución sistema

1. Colocación de apeo, compuesto por puntales metálicos; sopandas y durmientes de madera.
2. Levantamiento del entablado adosado a la zona próxima a la cabeza de viga.
3. Se retiran las viguetas dañadas.
4. Se sanea la viga, haciendo un corte dentado por la zona sana.
5. Se limpia el hueco dejado por la pieza y se realiza una base con mortero de nivelación para la colocación del perfil U.
6. Se realizan los taladros para la sujeción del perfil a la viga de madera.
7. Se coloca el perfil adosado a la viga de madera a través de pernos.
8. Relleno del interior del perfil con mortero de alta resistencia.
9. Se deja reposar el tiempo suficiente para que se produzca el curado del mortero de alta resistencia.
10. Se vuelven a colocar las viguetas nuevas y se reconstruye el entablado.
11. Macizado de los huecos de pared, que se realizarán para la colocación del perfil.
12. Finalmente se retiran los apeos, para que el forjado vuelva a entrar en carga.

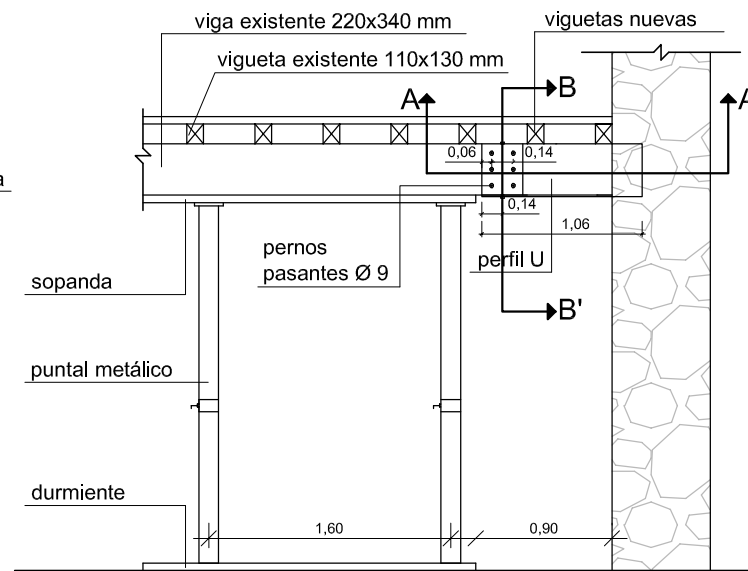
Detalle apuntalamiento E 1:50

Estado actual



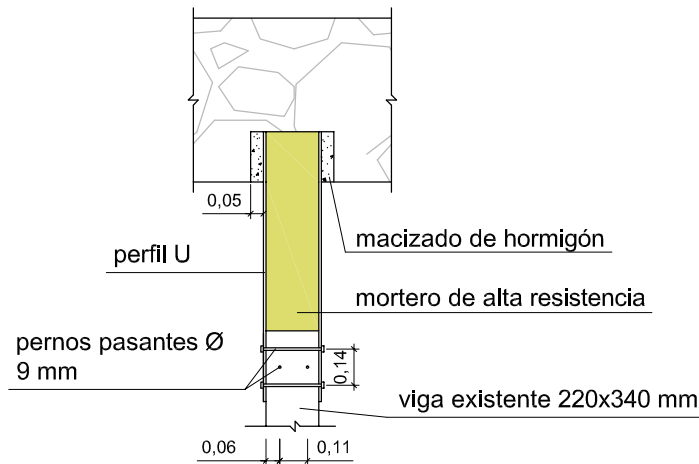
Detalle consolidación con perfil metálico E 1:50

Estado reformado



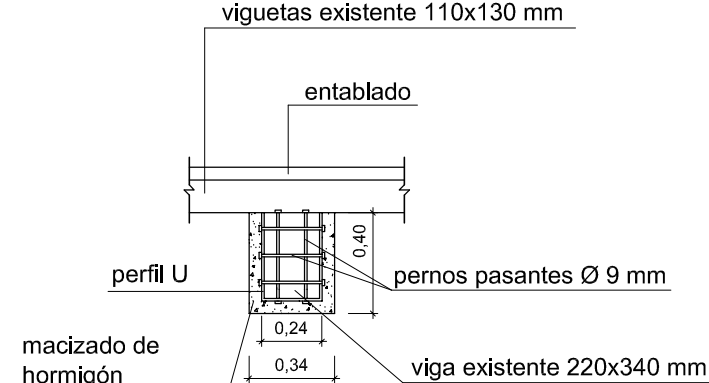
Sección A-A' E 1:30

Estado reformado



Sección B-B' E 1:30

Estado reformado



INTERVENCIÓN

Nº PLANO I 01

PLANO Consolidación mediante perfil U

ESTADO Reformado COTAS M

AUTORA Goyo Calo, Laura FIRMA



▪ Daño

Pudrición en cabeza de viga, por ataque de hongos xilófagos. El alcance del daño es grave, afecta a la capacidad portante del elemento estructural.

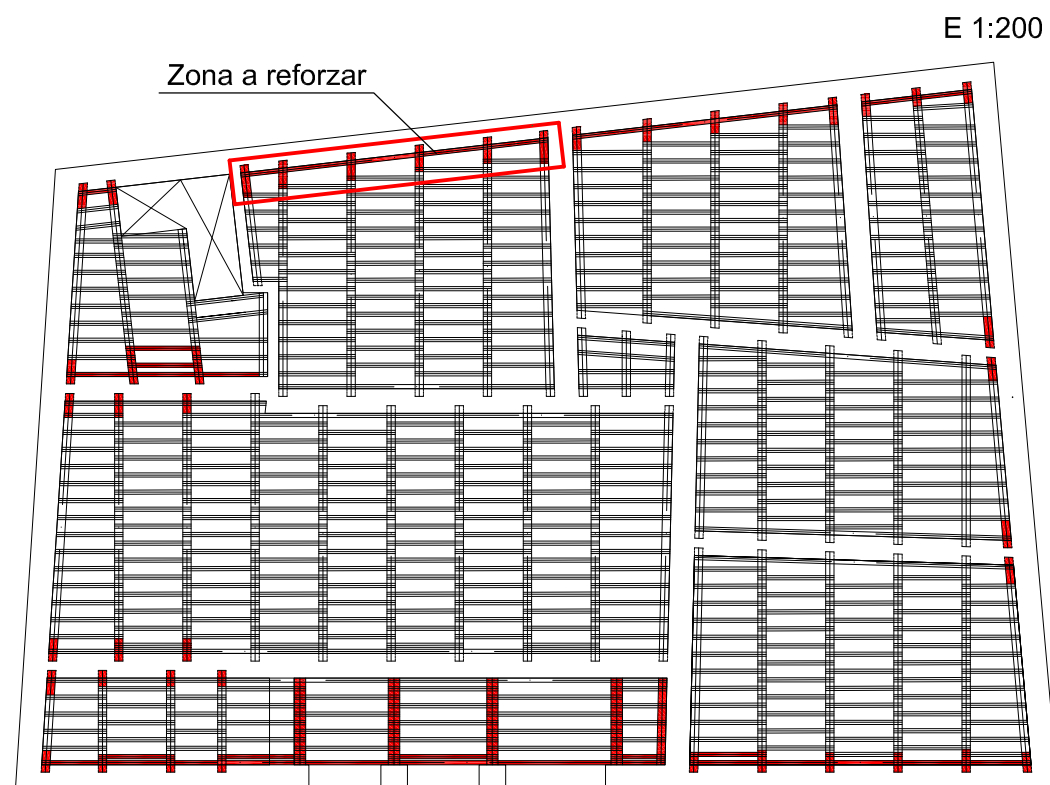


▪ Propuesta de refuerzo: Prótesis de madera

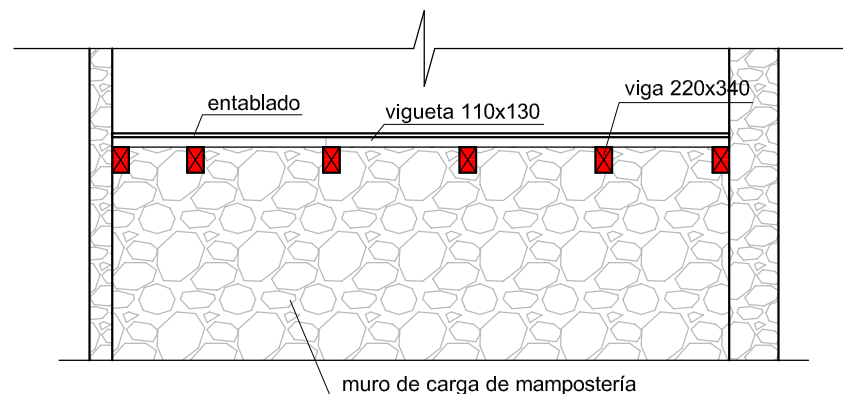
El sistema propuesto para reforzar la zona dañada consiste en la colocación de una prótesis de madera cosida a través de barras de fibra de vidrio.

▪ Pasos ejecución sistema

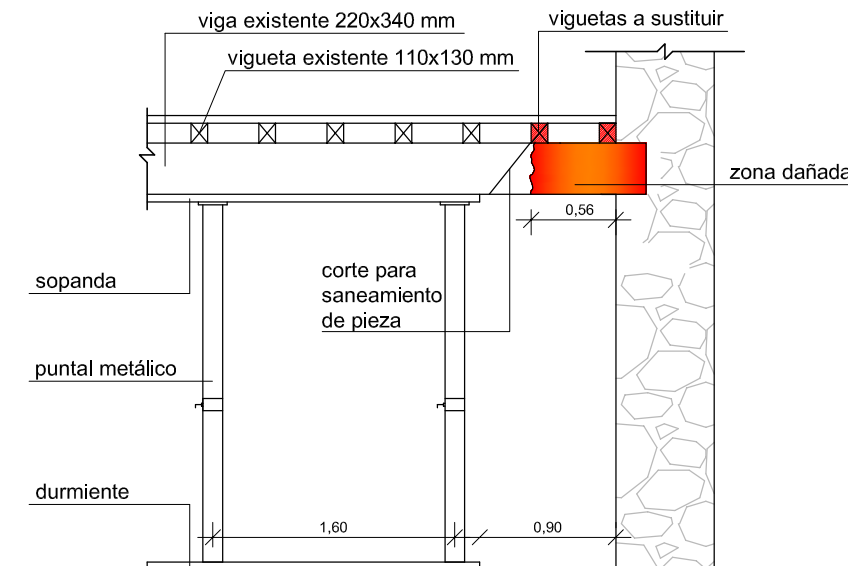
1. Colocación de apeo, compuesto por puntales metálicos; sopandas y durmientes de madera.
2. Levantamiento del entablado adosado a la zona próxima a la cabeza de viga.
3. Se retiran las viguetas dañadas.
4. Se sanea la viga, haciendo un corte inclinado por la zona sana.
5. Se limpia el hueco dejado por la pieza y se realiza una base con mortero de nivelación para la colocación de la nueva pieza.
6. Se coloca la prótesis de madera
7. Colocación de un apeo bajo la prótesis para sostener la pieza, y proceder a realizar los talados donde se ubicarán las varillas de fibra de vidrio.
8. Tras la colocación de las varillas se introduce una resina epoxi en las perforaciones, para rellenar el hueco generando la perfecta vinculación entre la pieza nueva y la existente a través de las varillas.
9. Se deja reposar el tiempo suficiente para que se produzca el curado de la resina epoxi.
10. Se vuelven a colocar las viguetas nuevas y se reconstruye el entablado.
11. Finalmente se retiran los apeos, para que el forjado vuelva a entrar en carga.



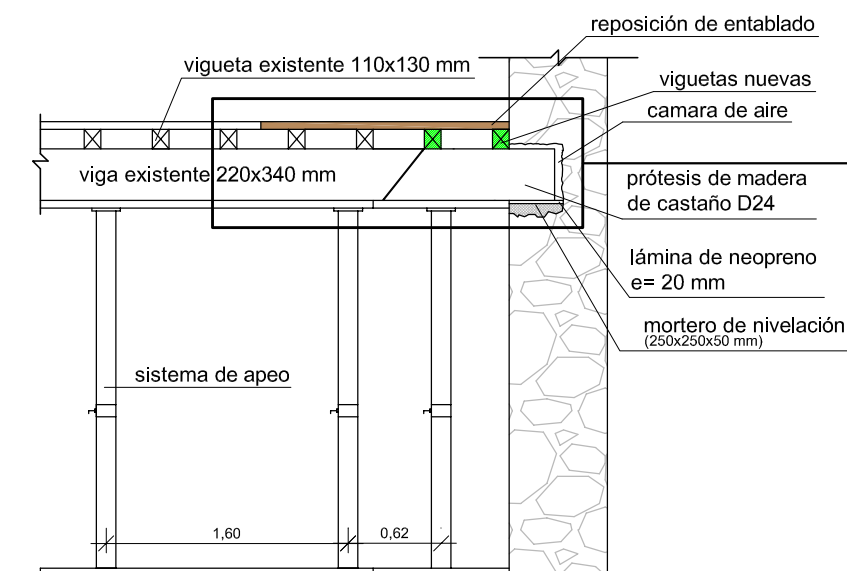
Alzado zona a reforzar
Estado actual E 1:100



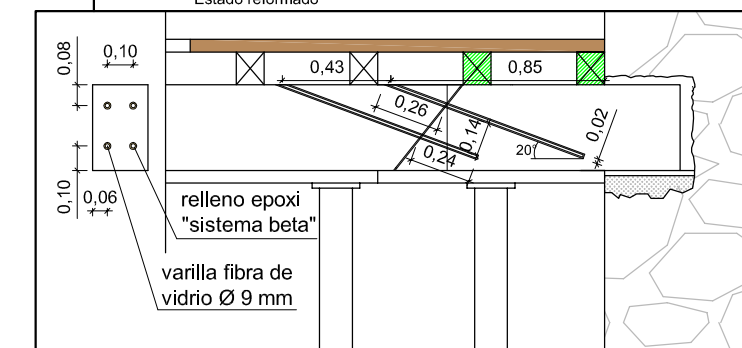
Detalle apuntalamiento E 1:50
Estado actual



Detalle sistema prótesis E 1:50
Estado reformado



Detalle colocación varillas E 1:30
Estado reformado



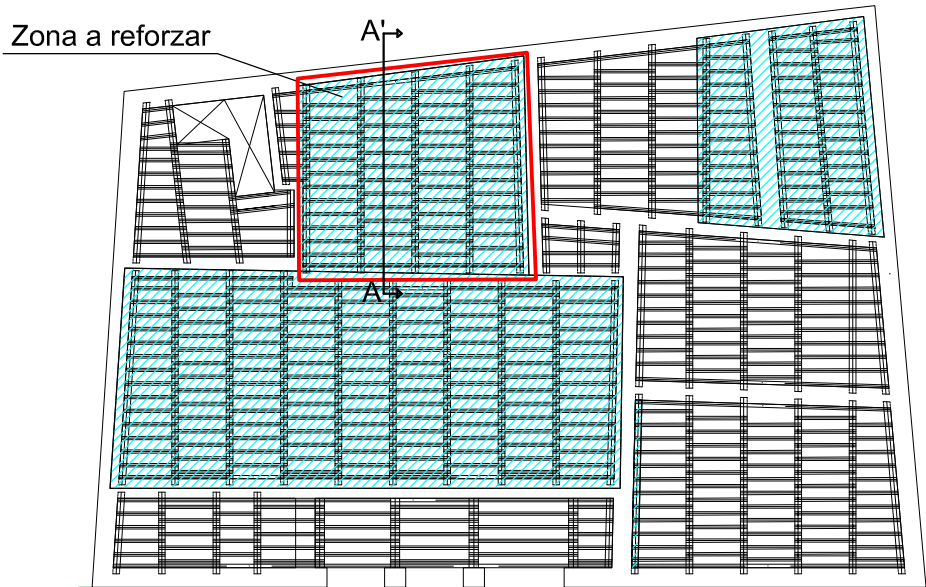


▪ Daño

Deformación excesiva. En la sección A-A' se muestra el detalle del estado de las vigas.



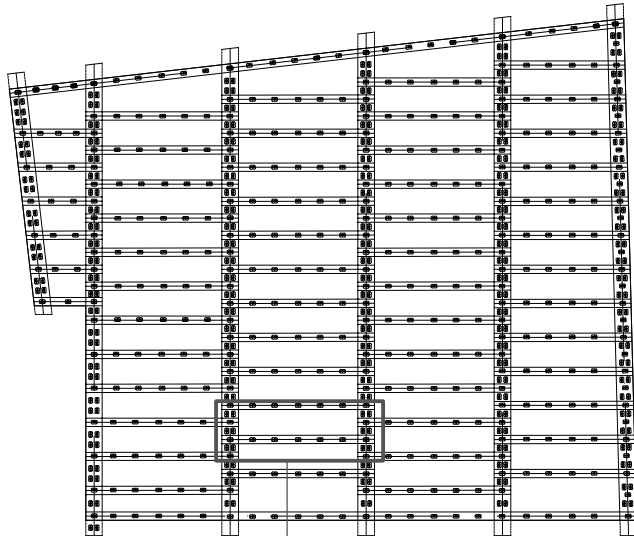
E 1:250



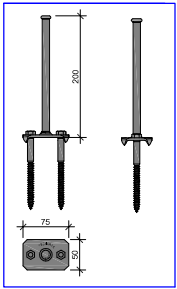
▪ Propuesta de refuerzo: sistema mixto madera-hormigón

El sistema propuesto para reforzar la zona dañada consiste en la consolidación de la estructura a través de la colocación de una losa de hormigón vinculada a la madera con conectores.

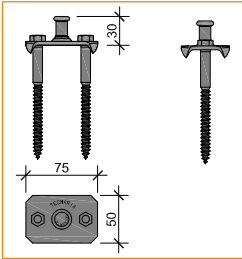
Planta forjado con distribución de conectores E 1:100
Estado reformado



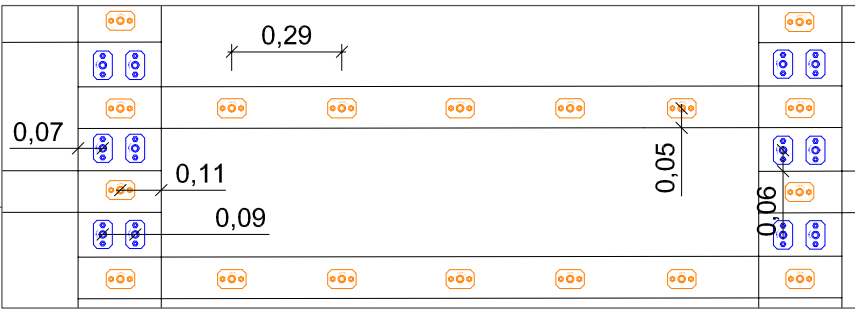
CTL MAXI 12/200
colocación sobre vigas
Conector h=200 mm
2 tornillos Ø10 L=120 mm



CTL MAXI 12/30 colocación sobre viguetas
Conector h=30mm
2 tornillos Ø10 L=120 mm



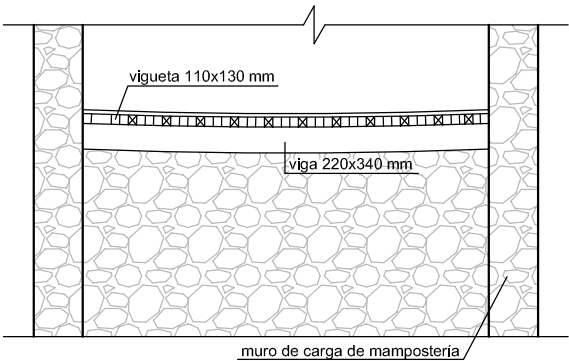
E 1:20



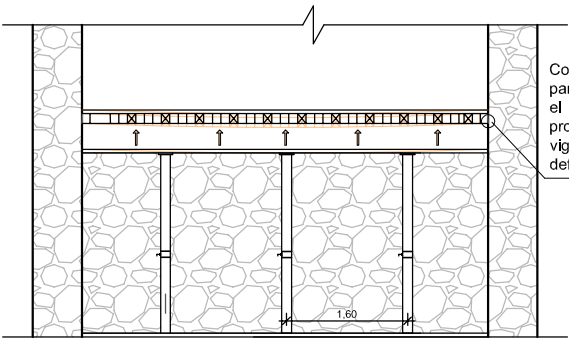
▪ Pasos ejecución sistema

1. Se apea la estructura, de forma que se consigue recuperar en la medida de lo posible la deformación sufrida en las vigas.
2. Se levanta el enladrado en las zonas donde están ubicadas las vigas.
3. Se colocan piezas de madera adosadas a las vigas en los huecos entre viguetas, para conformar el encofrado evitando que se pierda el hormigón al ser vertido.
4. Colocación de una lámina de plástico sobre el enladrado, para evitar pérdidas de hormigón a través de las juntas.
5. Disposición de los conectores sobre el enladrado y las vigas.
6. Colocación de la malla electrosoldada.
7. Se vierte el hormigón sobre el forjado.
8. Finalmente tras el endurecimiento de la capa de hormigón se puede proceder a la retirada del sistema de apeo y de las piezas de encofrado.

Sección A - A' E 1:100
Estado actual

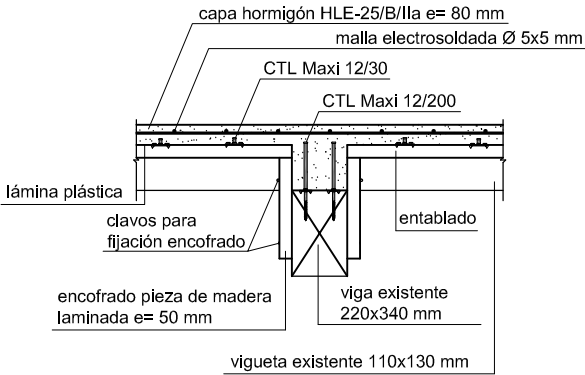


Detalle apeo estructura E 1:100
Estado reformado

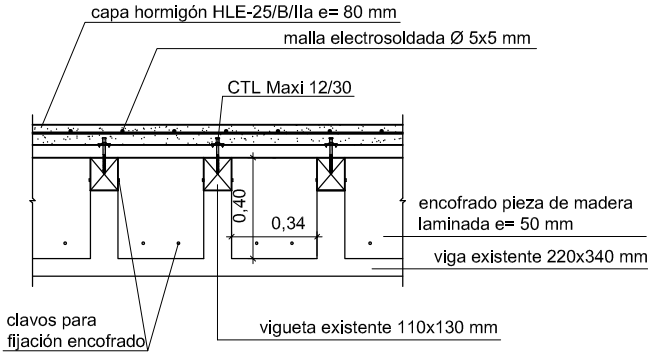


Colocación de cuñas para evitar levantar todo el forjado, mientras se produce el empuje de la viga para recuperar la deformación.

Sección transversal por viga E 1:30
Estado reformado



Sección transversal por vigueta E 1:30
Estado reformado



INTERVENCIÓN

Nº PLANO I 03

PLANO Sistema mixto madera-hormigón

ESTADO Reformado

COTAS M

AUTORA Gayo Calo, Laura

FIRMA

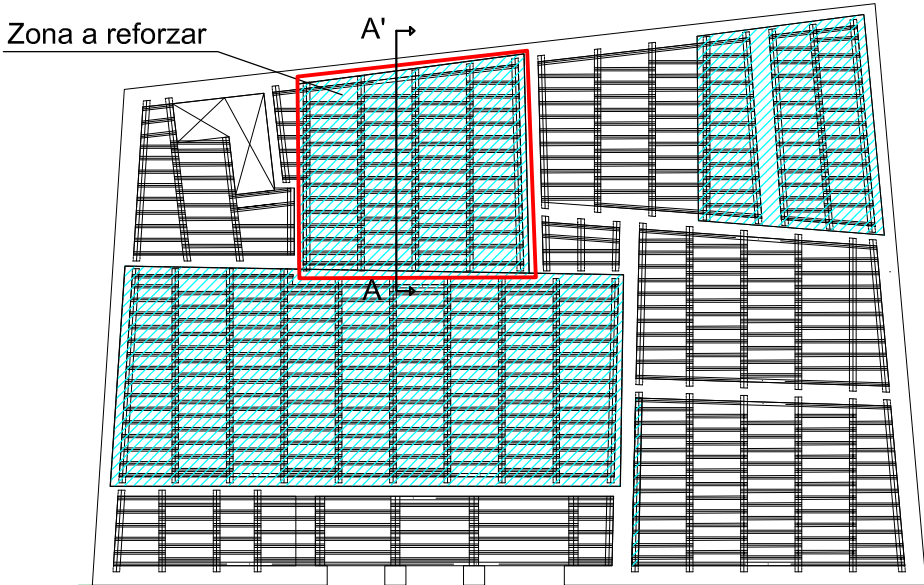


▪ Daño

Deformación excesiva. En la sección A-A' se muestra el detalle de estado de las vigas.



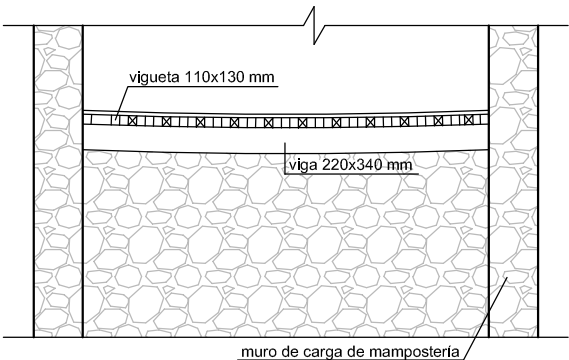
E 1:250



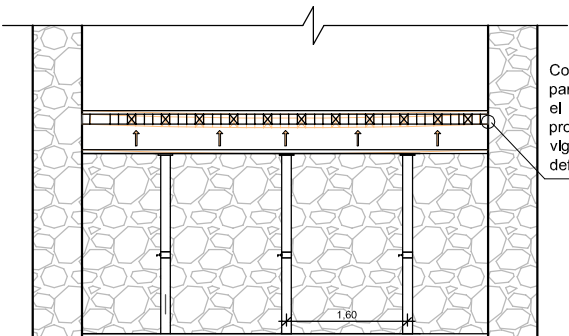
▪ Pasos ejecución sistema

1. Se apea la estructura, buscando recuperar la deformación producida en la viga.
2. Se harán dos huecos en el muro a los lados de la viga afectada y se construirá una base con mortero de nivelación para que la repartición de las cargas de las vigas de refuerzo.
3. Se colocarán dos perfiles laminados UPN cogidos a ambos lados de la viga afectada (previa protección de sus cabezas con pinturas antioxidantes).
4. Se colocarán pernos pasantes entre las dos nuevas vigas de refuerzo y la madera existente para que actúen a la vez.
5. Se rellenarán de nuevo los agujeros hechos para apoyar las vigas de refuerzo.
6. Se llenarán con cuñas los posibles espacios que pudiesen haber quedado entre las nuevas vigas y el techo, ya que es imprescindible para hacer entrar en carga el forjado.

Sección A - A' E 1:100
Estado actual



Detalle apeo estructura E 1:100
Estado reformado

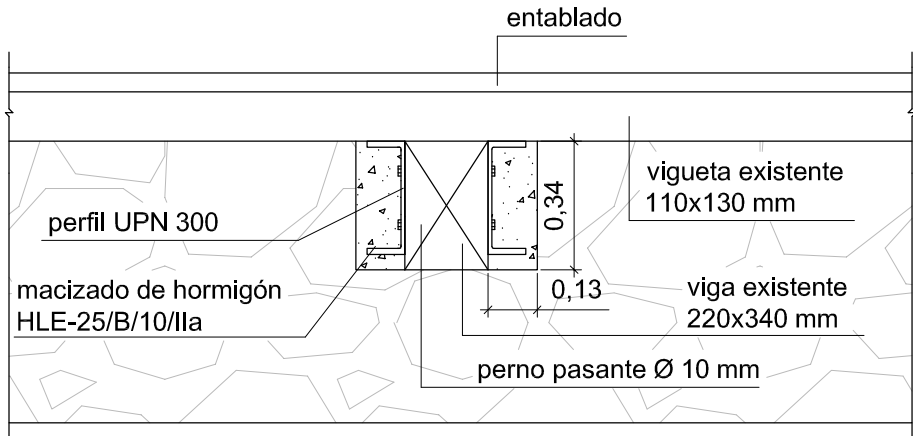


Colocación de cuñas para evitar levantar todo el forjado, mientras se produce el empuje de la viga para recuperar la deformación.

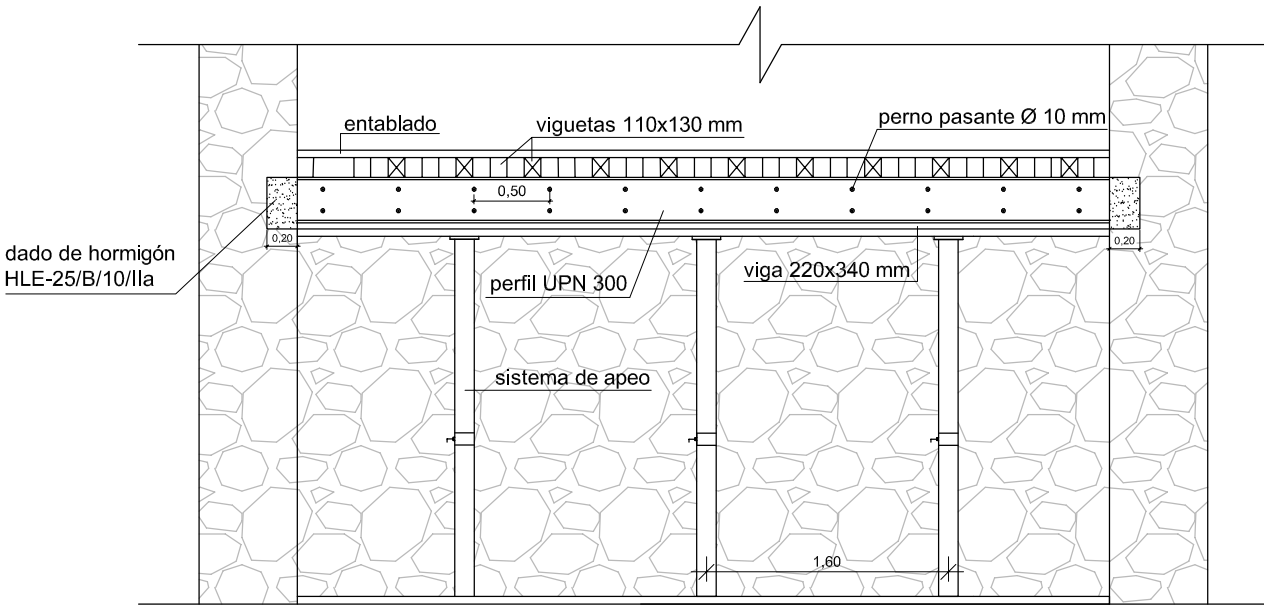
- Propuesta de refuerzo: perfiles metálicos adosados a los laterales de la viga

El sistema propuesto para reforzar la zona dañada consiste en la colocación de dos perfiles UPN a ambos lados de la viga unidos mediante pernos pasantes.

Detalle empotramiento en muro de carga E 1:20
Estado reformado



Consolidación con perfil metálico E 1:50
Estado reformado



INTERVENCIÓN

Nº PLANO I 04

PLANO Consolidación con perfiles laterales metálicos

ESTADO Reformado COTAS M

AUTORA Gayo Calo, Laura

FIRMA



▪ Daño

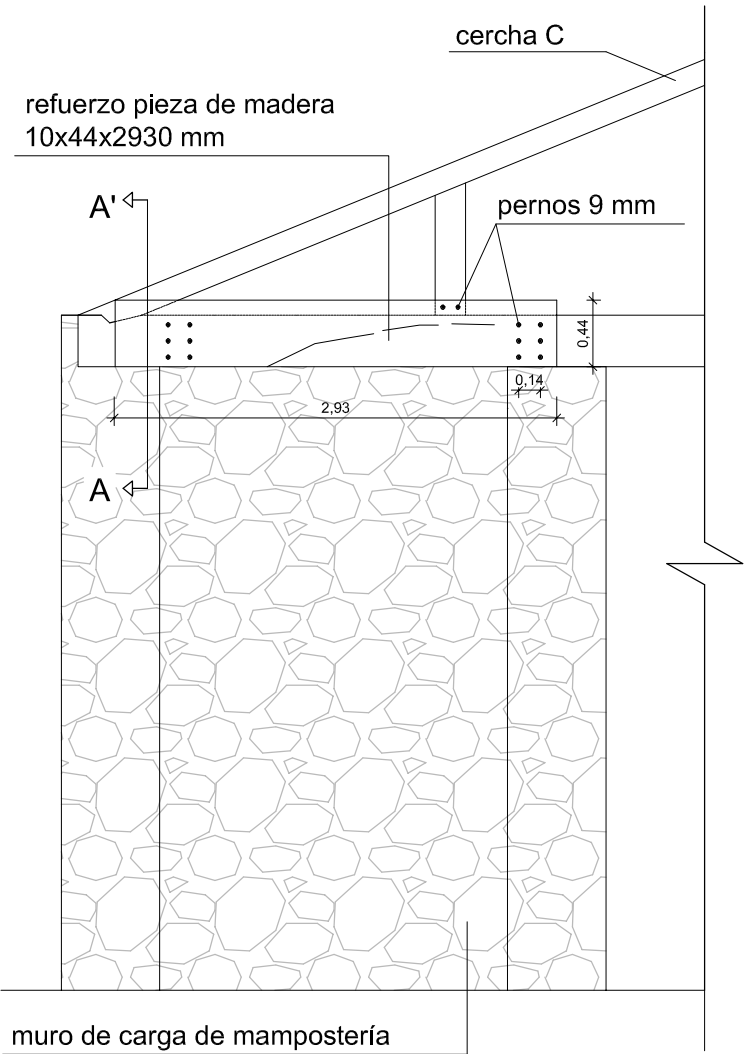
Rotura de una pieza del
cordón inferior de cercha



- Propuesta de refuerzo: consolidación mediante aporte de piezas de madera adosadas a cordón inferior de cercha

El sistema propuesto para reforzar la zona dañada consiste en la colocación de dos piezas de madera a ambos lados del cordón inferior de la cercha, unidas mediante pernos pasantes.

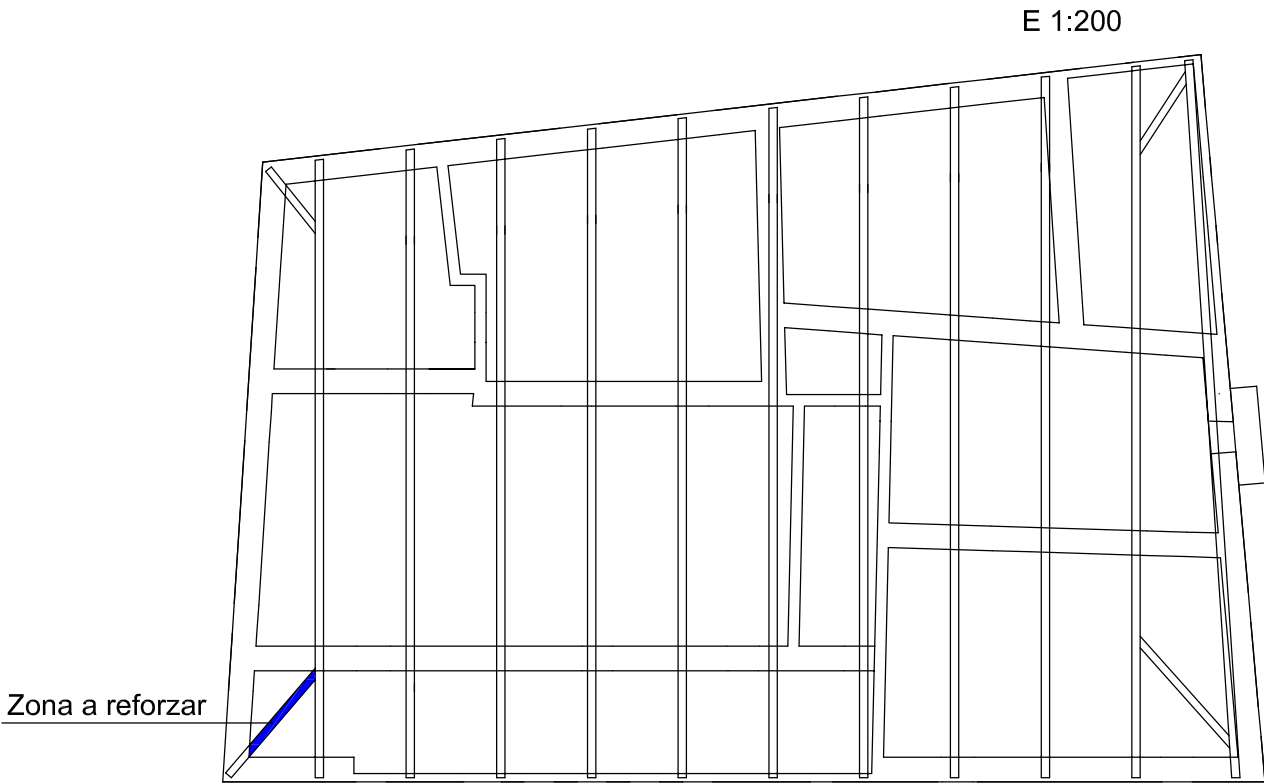
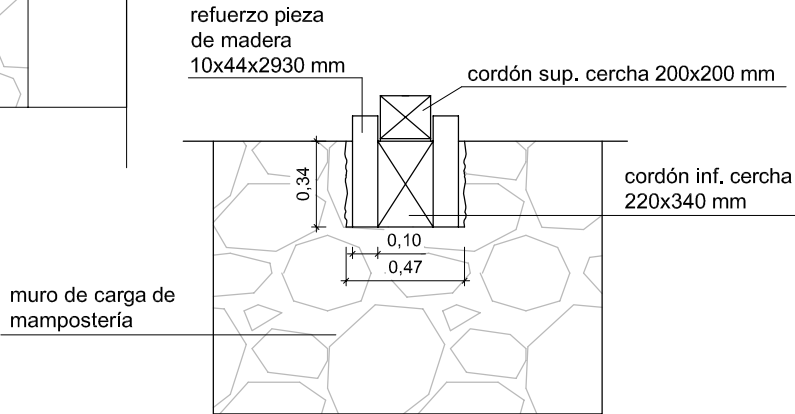
Detalle consolidación con piezas de madera E 1:50
Estado reformado



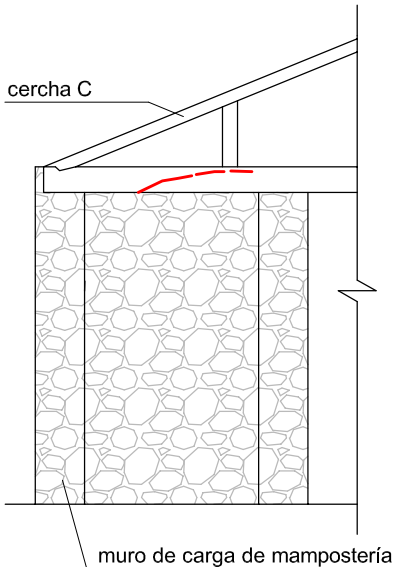
▪ Pasos ejecución sistema

1. Colocación de apeo metálico debajo de la zona donde se ha producido la rotura.
2. Apertura de huecos en muros, para ubicar las piezas de refuerzo.
3. Disposición taladros para colocación de los pernos que vincularán la pieza existente con los elementos de refuerzo.
4. Se colocan las piezas de madera adosadas a la pieza dañada unida con los pernos.
5. Se retira el apeo.

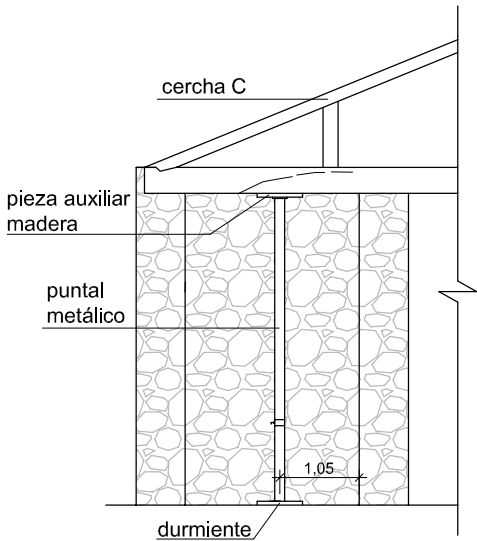
Sección A - A' E 1:30
Estado reformado



Detalle localización de fendas E 1:100
Estado actual



Detalle apeo metálico E 1:100
Estado reformado



INTERVENCIÓN

Nº PLANO I 05

PLANO

Sistema aporte de madera

ESTADO

Reformado

COTAS

M

AUTORA

Gayo Calo, Laura

FIRMA

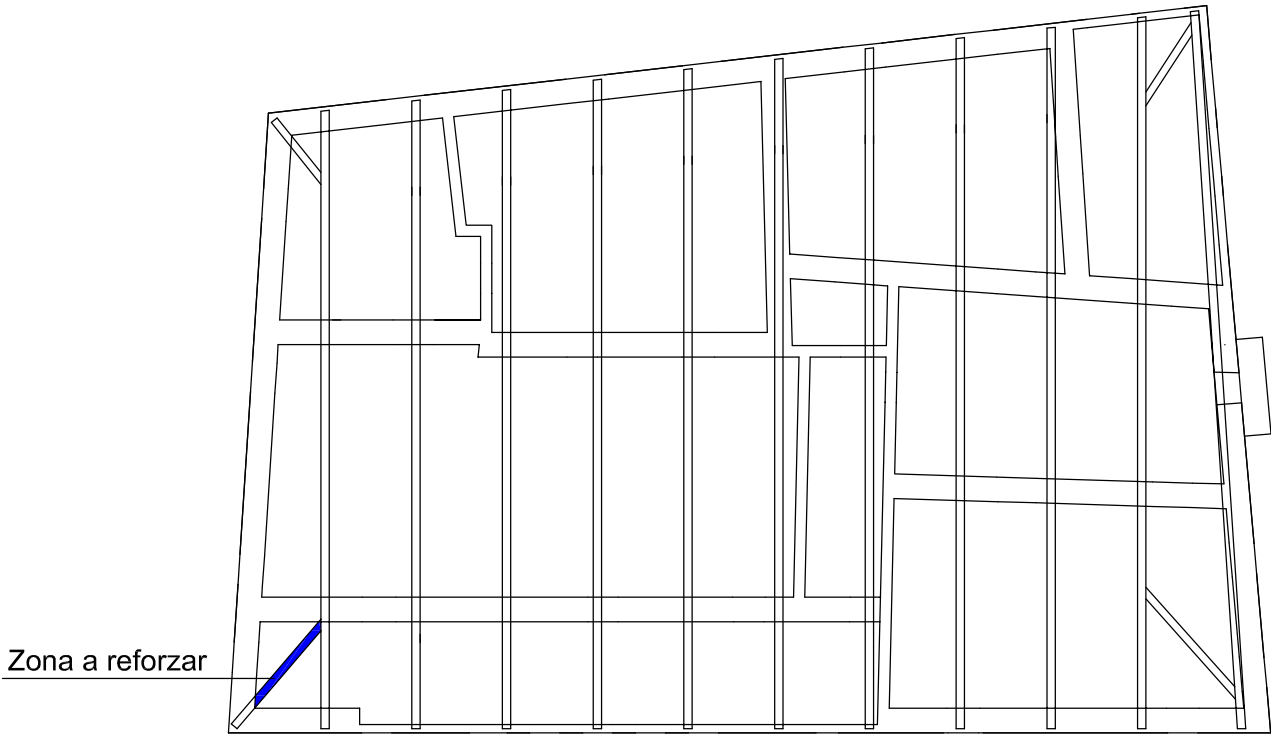


▪ Daño

Rotura de una pieza del
cordón inferior de cercha



E 1:200



▪ Propuesta de refuerzo: colocación de bandas FRP

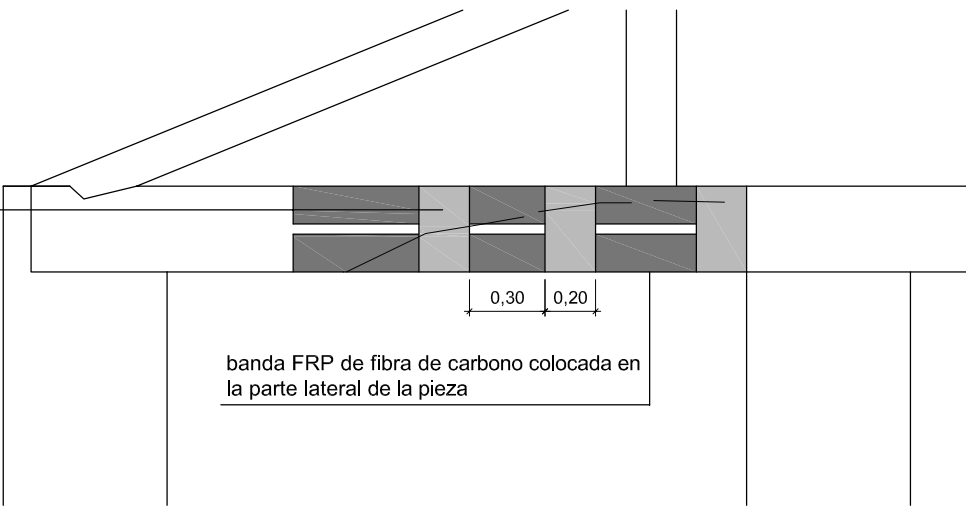
El sistema propuesto consiste en adherir externamente láminas de FRP alrededor de toda la pieza dañada.

▪ Pasos ejecución sistema

1. Preparación del soporte: limpieza.
2. Preparación de los laminados: comprobar la longitud antes de cortarlo y aplicarlo. Realizar una limpieza de los Laminados eliminando polvo residual, aceite, grasa, contaminantes, etc
3. Preparación del adhesivo.
4. Aplicar una capa de adhesivo en el soporte y otra capa de adhesivo sobre las bandas de FRP.
5. Aplicación de las láminas pasando el rodillo de goma dura, apretando la banda sobre el soporte, para asegurar el pleno contacto con el soporte.
6. Tras aplicar la primera capa como se ha descrito anteriormente y antes de colocar una segunda capa de bandas se vuelve hacer una limpieza sobre las láminas ya colocadas.

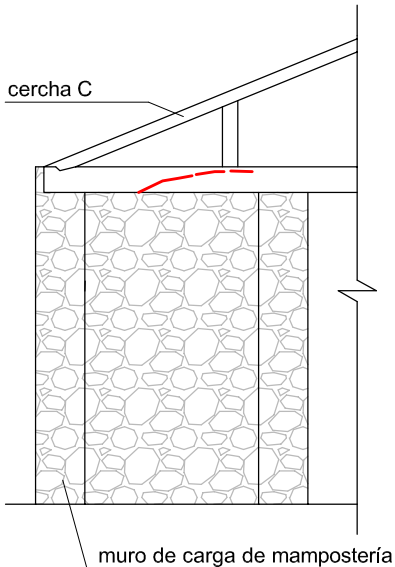
Detalle consolidación con banda FRP E 1:30
Estado reformado

bandas FRP de fibra de carbono
colocadas abrazando la pieza.

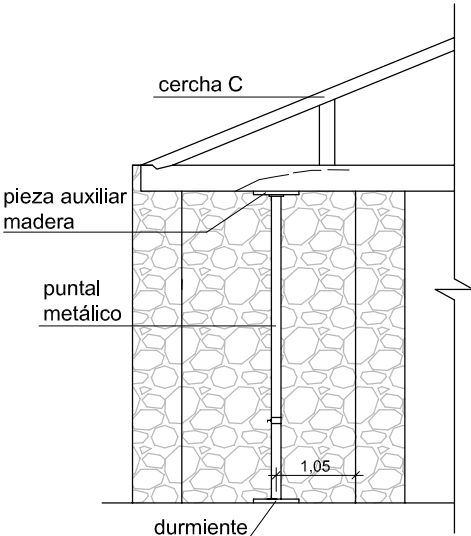


banda FRP de fibra de carbono colocada en
la parte lateral de la pieza

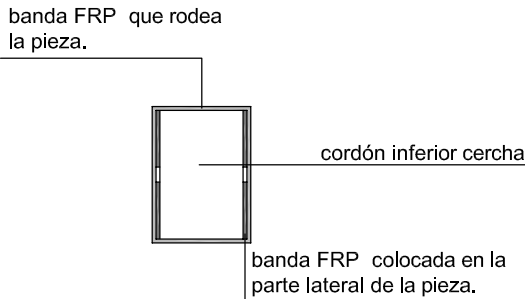
Detalle localización de fendas E 1:100
Estado actual



Detalle apeo con tablonos de madera E 1:100
Estado reformado



Sección transversal cordón inferior cercha con banda FRP E 1:20
Estado reformado



INTERVENCIÓN

Nº PLANO I 06

PLANO Sistema de consolidación con bandas FRP

ESTADO Reformado COTAS M

AUTORA Gayo Calo, Laura

FIRMA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abasolo, A., Bollati Pato, M., Camino Olea, M. S., Canalda Contreras, J., Diez de Güemes Pérez, J., & Esbert Alemany, R. (1998). *Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales*. Madrid: Editorial Munilla-Lería.
- AITIM. (01 de 06 de 2015). *cscae (Consejo Superior de los colegios de arquitectos de España)*. Obtenido de http://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/actividades/act_paginas/libro/productos_de_madera_para_la_arquitectura.pdf
- AL-FER: conector seco AL-FER. (Consulta: 11 mayo 2015). Disponible en: <http://www.al-fer.portaliweb.com/legno-calcestruzzo>
- Alpha: 2B.04 – Actuación en estructuras de cubiertas de madera (sitio web). Sistemas de protocolos compuestos, 2014. (Consulta: 7 mayo 2015). Disponible en: <http://www.protocolosrestauracion.com/web/datos/2b-03-actuacion-en-estructuras-de-cubiertas-de-madera/>
- Álvarez Leiva, C., & Macías Seda, J. (2007). *Manual de procedimientos en gestión de crisis*. Madrid: ARÁN.
- Archiproducts: Forjados mixtos de madera y hormigón (sitio web). (Consulta: 6 junio 2015). Disponible en: <http://www.archiproducts.com/es/47/forjados-forjados-mixtos-de-madera-y-hormigon.html>
- Arriaga Martitegui, F., Peraza Sánchez, F., Esteban Herrero, M., Boadilla Maldonado, I., & García Fernández, F. (2002). *Intervención en estructuras de madera*. Madrid: Artes gráficas Palermo, S.L.
- Bellmunt i Ribas, R. (2003). *Los conectores entre vigas de madera y losas de hormigón*. ITeC.
- Calavera, J. (2002). *Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación unidireccionales y sin vigas-hormigón metálicos y mixtos*. Madrid: INTEMAC.
- Casado, M., Pinazo, O., Basterra, L.A., Acuña, L. (2005) *Técnicas de Ensayo No Destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos: aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular*. *Actas del IVº Congreso Nacional de protección de la madera*. CIDEMCO (Ed.) Donostia-San Sebastián.
- Corradi, M., & Borri, A. (2007). Fir and chestnut timber beams reinforced with GFRP pultruded elements. *Composites: Part B* 38, 172-181.
- de Arias y Scala, F. (1887). *Carpintería antigua y moderna*. Barcelona: imprenta, litografía y casa editorial de F. Nacente.
- Díaz Gómez, C. (s.f.). *academia.edu*. Obtenido de http://www.academia.edu/9134505/Herramienta_8_Las_t%C3%A9cnicas_de_rehabilitaci%C3%B3n_reforzar_las_estructuras
- Diodato, M. (2009). Huellas de artesanía constructiva. Características de los forjados históricos de Valencia. *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Valencia, 21-24 octubre 2009*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

- Edifica* Vilssa. magazine arquitectura y construcción (sitio web). (Consulta: 6 febrero 2015). Disponible en: <http://www.construccion-y-reformas.vilssa.com/articulos/una-casa-de-madera-diferente>
- Egoin: Catalogo-clt-egoin2 (sitio web). (Consulta: 25 marzo 2015). Disponible en: <http://www.egoin.com/recursos/catalogo-clt-egoin2.pdf>
- Francisco Coronel: Placas estructurales prefabricadas alivianadas de madera para losas de entrepiso y cubierta (sitio web). *Academia.edu*. (Consulta: 24 marzo 2015). Disponible en: http://www.academia.edu/9112110/Placas_estructurales_prefabricadas_alivianadas_de_madera_para_losas_de_entrepiso_y_cubierta
- García Esteban, L., Guindeo Casasús, A., Peraza Oramas, C., & de Palacios de Palacios, P. (2003). *La madera y su anatomía*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- González Bravo, C. (s.f.). Recuperación de forjados de madera mediante refuerzos y prótesis metálicas. *CERCHA*.
- González-Bravo, C., Arriaga, F., Íñiguez-González, G., Maldonado, L. Prótesis metálicas para la reparación de cabezas de vigas de madera degradadas (en línea). Madrid: Informes de la Construcción Vol. 63, 521, 37-45, 2011. (Consulta: 2 mayo 2015). Disponible en: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1226/1311>
- Kielsteg: Innovative Smart Wood structures (sitio web). (Consulta: 23 marzo 2015). Disponible en: <http://www.kielsteg.at/was-ist-kielsteg/?lang=en>
- Landa Esparza, M. (1998). Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera-unión encolada. (En línea). (Consulta: 21 abril 2015). *Dadun: depósito académico digital universidad de navarra*. Obtenido de <http://dadun.unav.edu/handle/10171/17434>
- Esteban, M., Arriaga, F., Íñiguez, G., Bobadilla, I., Mateo R. Influencia de las fendas en la resistencia de la madera estructural (en línea). Madrid: Materiales de Construcción Vol. 60, 299, 115-132, 2010. (Consulta: 28 abril 2015). Disponible en: <file:///C:/Users/Laura/Google%20Drive/TFG/bibliografia%20usada/Influencia-de-las-fendas-en-la-resistencia-de-la-madera-estructural-Inst-Torroja.pdf>
- Mecanoviga: Rehabilitación de techos y forjados (sitio web). (Consulta: 4 junio 2015). Disponible en: <http://www.mecanoviga.com/>
- Molins i Borrell, C., & Serrà i Martín, I. (2004). Aspectos fundamentales para el diseño de un refuerzo estructural. *CSIC: Informes de la construccion Vol 55, Nº 490*, 39-48.
- Negrão, João H., Oliveira, Francisco M., Oliveira, Catarina L. Investigation on Timber-Concrete Glued Composites. Coimbra, Portugal: Department of Civil Engineering, University of Coimbra.
- NOU/BAU: El sistema de renovación de techos (sitio web). (Consulta: 4 junio 2015). Disponible en: <http://www.noubau.com/>

- Nowak, T., Jasienko, J., & Czepizak, D. (2013). Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 197–206.
- Nuere, E. (2007). Madera, en restauración y rehabilitación. *informes de la construcción CSIC, Vol 59, Nº 506*, 123-130.
- Nuria Prieto: Atelier en Landecy (2014) (sitio web). Tectonicablog. (Consulta: 28 abril 2015). Disponible en: <http://tectonicablog.com/?p=82890>
- Pardo Ros, José Luís (1997). Estructuras mixtas de hormigón-Madera aplicadas a la rehabilitación de forjados (tesis doctoral en línea). D. José MONFORT LLEONART, director. Universidad Politécnica de Valencia, (consulta: 11 mayo 2015). Disponible en <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/4481/tesisUPV809.pdf>
- Peter Cox: refuerzo de pisos de madera. (Consulta: 9 junio 2015). Disponible en: <http://www.petercoxitalia.it/rinforzo%20solai.asp>
- Rebeca Vega: Forjados De Paneles Kielsteg (sitio web). (Consulta: 24 marzo 2015). Disponible en: <http://www.rebecavega.es/forjados-de-paneles-kielsteg/>
- Renofors: Reconstrucción de piezas de madera. (sitio web). (Consulta: 9 abril 2015). Disponible en: <http://renofors.com/es/savoir-faire/madera>
- Rodríguez Martín, L. F. (1991). *Forjados*. Madrid: Fundación Escuela de la Edificación.
- Rothoblaas (2013). *Catálogo Structural renovation*. (consulta 09 junio 2015) Obtenido de http://www.rothoblaas.com/uploads/media/structural-renovation-en____14.pdf
- Tecnaria: Ficha técnica conector de perno y crampones. (Consulta: 9 junio 2015). Disponible en: <http://www.refuerzo-forjados.com/legno/scheda-tecnica.htm>
- Tknika: Manual técnico de formación para la caracterización de madera de uso estructural (sitio web). País Vasco: Centro de Innovación y Aprendizaje Permanente. (Consulta: 24 febrero 2015). Disponible en: <http://normadera.tknika.net/es/content/pudriciones>
- Valeri, J. (s.f.). Soluciones constructivas para la rehabilitación de viviendas de alta montaña. Institut de tecnologia de la construcció de catalunya.
- Vasallo Toranzo, L., & Pérez de Castro, R. (2010). *Artesonados: Carpintería de lo blanco en la tierra de campos zamorana*. Zamora: Junta de Castilla y León.
- Vicente Navarro, J. (Junio 2009). *La evolución de los forjados de edificación hacia unas técnicas más competitivas económicamente*. Universidad politécnica de Cataluña: Proyecto final de carrera.
- Vignote Peña, S., & Martínez Rojas, I. (2006). *Tecnología de la madera*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Vignote Peña, S., Martínez-Rojas, I., & Villasante Plágaro, A. (2013). La silvicultura y calidad de la madera (en línea). *Escuela tecnica superior de ingenieros de montes*. (Consulta 02 Julio 2015). Disponible en: http://www.montes.upm.es/sfs/E.T.S.I.%20Montes/La%20Escuela/ActosInstitucionales/Lecciones/Ficheros_Est%C3%A1ticos/LECCI%C3%93N%20INAUGURAL%202013-S.VIGNOTE.pdf

TFG: Estudio comparativo de sistemas de rehabilitación en forjados de madera.

Zanni, E. (2004). *Patología de la madera: degradación y rehabilitación de estrecturas de madera*. Córdoba: Brujas.

CONTENIDO DEL CD

Fichero formato PDF de nombre: GAYOCALO_LAURA_TFG_2015.pdf

Título: Estudio comparativo de sistemas de rehabilitación en forjados de madera.

Autora: Laura Gayo Calo

Directora del TFG: M. Dolores Otero Chans

Año: 2015

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es el estudio de diferentes tipos de sistemas de reparación y/o refuerzos en forjados de madera, para la consolidación y conservación de las estructuras realizadas con dicho material.

El trabajo consta de dos líneas de estudio fundamentales, una primera de ámbito teórico y la segunda más enfocada a una aplicación práctica.

La primera ha consistido en la descripción previa de lo que es un forjado, incluyendo el estudio de sus funciones y tipologías. Se ha narrado la evolución sufrida en los forjados, partiendo desde las maneras antiguas de elaborarlos hasta los sistemas más actuales, los cuales gracias a las nuevas tecnologías, han revolucionado su construcción al introducir nuevos materiales compuestos de madera, nuevos elementos y nuevos modos de fabricación.

Se ha presentado una breve descripción de la madera como material junto con sus propiedades. Aspecto importantísimo a tener en cuenta, ya que serán sus propiedades las que influyan de manera determinante en su comportamiento como elemento estructural.

Se han estudiado las causas de patologías que afectan a la madera, las cuales son responsables de la necesidad de realizar intervenciones de sustitución o reparación, para asegurar la integridad y estabilidad de las estructuras afectadas. Con ello, se han presentado a su vez, las técnicas de inspección para poder establecer una buena evaluación de daños, utilizando los métodos más apropiados en cada caso, evitando así, una mala gestión en las reparaciones.

La segunda parte del trabajo se orienta hacia un ámbito práctico, donde se analizan los posibles sistemas de reparación en forjados existentes en la actualidad. Describiendo su proceso de ejecución junto con las posibles ventajas e inconvenientes que resultan de su aplicación.

Finalmente se ha procedido a realizar una materialización de los conceptos estudiados, por medio de un ejemplo práctico, donde se han analizado una serie de métodos de intervención, para la reconstrucción de un forjado en un pazo.